



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIAS DA INFORMAÇÃO
CURSO DE INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS

Hycullas Raianderson Cavalcante de Araújo

**VIABILIDADE E IMPACTOS DA IMPLEMENTAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS
OFFSHORE NO LITORAL POTIGUAR**

ANGICOS

2025

Hycullas Raianderson Cavalcante de Araújo

**Viabilidade e Impactos da Implementação de Parques Eólicos Offshore no Litoral
Potiguar**

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

Orientador: Marcos Vinicius Candido
Henriques, Prof. Dr.

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.

A663v Araújo, Hycullas Raiandderson Cavalcante de .
Viabilidade e Impactos da Implementação de
Parques Eólicos Offshore no Litoral Potiguar /
Hycullas Raiandderson Cavalcante de Araújo. -
2025.
52 f. : il.

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

1. energia eólica. 2. offshore. 3.
sustentabilidade. 4. litoral potiguar. 5. parques
eólicos. I. Henriques , Marcos Vinicius Candido ,
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.

Hycullas Raianderson Cavalcante de Araújo

**Viabilidade e Impactos da Implementação de Parques Eólicos Offshore no Litoral
Potiguar**

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

Defendida em: 28/7/2025.

BANCA EXAMINADORA

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

Janielly Gonçalves Araújo, Profa. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador

Sebastião Ferreira Baracho Neto, Prof. Me. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me sustentado até aqui. Sem Sua graça e direção, este caminho teria sido muito mais árduo.

Em segundo lugar, expresso minha eterna gratidão aos meus pais, Amina Kelle e Francisco Henrique, que supriram todas as minhas necessidades, fazendo o possível e o impossível para que este sonho se tornasse realidade. O apoio, o sacrifício e o amor incondicional de vocês foram fundamentais para que eu chegasse até este momento.

Aos meus irmãos, Hykaru e Hykailan, obrigado pela presença constante, pelo companheirismo e pelo incentivo nas horas difíceis.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Vinícius, pela paciência, dedicação e orientação técnica que foram indispensáveis ao desenvolvimento deste trabalho. Estendo meus agradecimentos à banca examinadora pela contribuição valiosa com suas observações e sugestões.

Aos meus amigos, que de diferentes formas me apoiaram nesta jornada acadêmica, deixo meu sincero obrigado. Em especial ao Jéferson e Angledson, pela amizade e companheirismo durante anos no quarto 19, vocês são mais que amigos, de certa forma viram meus irmãos também.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta conquista. Cada gesto, palavra de apoio e colaboração fez diferença no meu percurso. Esta vitória não é só minha, mas de todos que estiveram ao meu lado.

RESUMO

Esta monografia investiga a viabilidade técnica e os impactos da implantação de parques eólicos offshore no litoral do estado do Rio Grande do Norte, com ênfase no contexto energético, ambiental e tecnológico. A crescente demanda por fontes sustentáveis de energia e a necessidade de transição para uma matriz energética mais limpa impulsionam o estudo de alternativas como a energia eólica offshore, caracterizada por ventos mais intensos e constantes em comparação às condições onshore. O trabalho inicia-se com uma contextualização histórica e técnica sobre a energia eólica, abordando os principais componentes de um aerogerador, suas especificações operacionais e os critérios de viabilidade relacionados ao potencial eólico marítimo. Através de pesquisa documental e análise de dados disponibilizados por órgãos como o IBAMA e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), são mapeados os principais projetos em processo de licenciamento ambiental no estado, evidenciando a liderança do Rio Grande do Norte em propostas de geração offshore no Brasil. Além disso, o estudo destaca a importância estratégica das turbinas de grande porte, como o modelo V236-15.0 MW da fabricante Vestas, cuja tecnologia é analisada em termos de potência, eficiência e requisitos técnicos. Também são apresentadas as diferentes soluções de fundações fixas e flutuantes para instalação em mar aberto, considerando fatores como profundidade, solo marinho e custo de implantação. Conclui-se que, embora os projetos offshore ainda estejam em fase inicial no país, o litoral potiguar apresenta condições altamente favoráveis para seu desenvolvimento, especialmente devido à elevada incidência de ventos e à existência de infraestrutura portuária. A pesquisa reforça que a adoção da energia eólica offshore representa uma oportunidade real para a diversificação energética do Brasil e para o fortalecimento do desenvolvimento sustentável regional.

Palavras-chave: energia eólica; offshore; sustentabilidade; litoral potiguar; parques eólicos; viabilidade técnica.

ABSTRACT

This monograph investigates the technical feasibility and impacts of implementing offshore wind farms along the coast of Rio Grande do Norte, Brazil, with emphasis on the energy, environmental, and technological context. The growing demand for sustainable energy sources and the need to transition to a cleaner energy matrix drive the study of alternatives such as offshore wind energy, characterized by stronger and more constant winds compared to onshore conditions. The research begins with a historical and technical overview of wind energy, addressing the main components of a wind turbine, its operational specifications, and the viability criteria related to offshore wind potential. Through documentary research and data analysis provided by agencies such as IBAMA and the Energy Research Company (EPE), the main projects undergoing environmental licensing in the state are mapped, highlighting Rio Grande do Norte's leadership in offshore energy proposals in Brazil. Furthermore, the study emphasizes the strategic importance of large-scale wind turbines, such as the V236-15.0 MW model by the manufacturer Vestas, whose technology is analyzed in terms of power, efficiency, and technical requirements. The work also presents the various fixed and floating foundation solutions for offshore installation, considering factors such as sea depth, seabed type, and implementation costs. It concludes that although offshore projects are still in the early stages in Brazil, the Potiguar coast presents highly favorable conditions for their development, especially due to high wind incidence and existing port infrastructure. The research reinforces that the adoption of offshore wind energy represents a real opportunity for Brazil's energy diversification and for strengthening regional sustainable development.

Keywords: wind energy; offshore; sustainability; Potiguar coast; wind farms; technical feasibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Detalhe frontal de um aerogerador horizontal, destacando o rotor, responsável pela captação da energia cinética dos ventos e conversão em energia mecânica.....	21
Figura 2 - Funcionamento das Pás direções de vento e Pitch.....	21
Figura 3 - Componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal.....	24
Figura 4 - Gráfico da distribuição de Weibull.....	28
Figura 5 - Capacidade instalada global cumulativa de energia eólica offshore.....	29
Figura 6 - Participação de mercado de fabricantes de turbinas eólicas offshore para projetos operacionais.....	30
Figura 7 - Quantidade de projetos eólicos Offshore por região do Brasil.....	31
Figura 8 - Quantidade de projetos de energia eólica Offshore por Unidade da Federação.....	32
Figura 9 - Potência instalada de energia eólica Offshore por Unidade da Federação.....	32
Figura 10 - Projetos com processo de licenciamento Ambiental aberto no Ibama.....	33
Figura 11 - Potencial Eólico Offshore Anual do Rio Grande do Norte a 100 m de altura.....	34
Figura 12 - Potencial Eólico Offshore Anual do Rio Grande do Norte a 200 m de altura.....	34
Figura 13 - Localização dos campos eólicos offshore em processo de licenciamento no Rio Grande do Norte e parte do Ceará.....	35
Figura 14 - Fundação suction Bucket.....	36
Figura 15 - Fundações de fundo fixo usadas na indústria eólica offshore.....	37
Figura 16 - Fundações flutuantes eólicas offshore.....	39
Figura 17 - Aerogerador modelo V236-15.0 MW™ da fabricante Vestas.....	43
Figura 18 - Gráfico da Produção Anual de Energia do aerogerador V236-15.0 MW.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Projetos de parques eólicos offshore outorgados no Rio Grande do Norte.....	39
Tabela 2 - Dados técnicos do aerogerador V236-15.0 MW.....	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 OBJETIVOS.....	17
2 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE AEROGERADORES.....	18
2.1.1 Fator de Capacidade Eólica.....	18
2.2 CARACTERÍSTICAS DE VENTO.....	18
2.2.1 Origem do Vento:.....	18
2.2.1 Velocidade de corte inferior (<i>cut-in</i>) e superior (<i>cut-out</i>).....	19
2.3 FAIXA DE TEMPERATURA OPERACIONAL.....	20
2.4 ROTOR.....	21
2.4.2 Freio aerodinâmico (<i>Brake</i>):.....	21
2.4.3 Pás (<i>blades</i>):.....	22
2.4.4 Nacele.....	22
2.5 SISTEMA ELÉTRICO.....	23
2.5.1 Conversor de Frequência (50/60 Hz).....	23
2.6 CAIXA DE VELOCIDADES (<i>gearbox</i>).....	23
2.7 TORRE (<i>tower</i>).....	23
3 ENERGIA EÓLICA OFFSHORE.....	25
3.2 ENERGIA EÓLICA ONSHORE.....	25
3.2.1 ASPECTOS CONCEITUAIS.....	25
3.2.2 Potencial Eólico.....	26
3.2.3 Distribuição de Weibull.....	26
3.2 ENERGIA EÓLICA OFFSHORE NO MUNDO.....	28
3.3 ENERGIA EÓLICA OFFSHORE NO BRASIL.....	30
3.4 ENERGIA EÓLICA OFFSHORE NO RIO GRANDE DO NORTE.....	33
3.4.1 PROJETOS EM LICENCIAMENTO NO RN.....	34
3.5 TIPOS DE FUNDAÇÃO.....	35

3.6 POSITIVOS E NEGATIVOS.....	40
4 METODOLOGIA.....	40
5 RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	42
5.1 PROJETOS DE PARQUES EÓLICOS OFFSHORE DO RIO GRANDE DO NORTE....	42
5.2 ANÁLISE TÉCNICA DE AEROGERADORES.....	42
5.2.1 AEROGERADOR V236-15.0 MW.....	42
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a humanidade enfrenta a necessidade de buscar formas mais sustentáveis de energia, uma vez que a maior parte da energia mundial provém de combustíveis fósseis, uma fonte insustentável que causa significativa degradação ambiental e ecológica. Em resposta a esse desafio, é essencial investir em fontes de energia mais limpas, como solar, eólica, hídrica, geotérmica e biomassa (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2024).

A sociedade contemporânea busca constantemente formas de alcançar a sustentabilidade energética. Atualmente, a principal fonte de energia no mundo ainda é baseada em combustíveis fósseis, uma opção insustentável que provoca ampla degradação ambiental e ecológica. Por esses motivos, é crucial procurar fontes de energia mais limpas, como solar, eólica, hídrica, geotérmica e biomassa (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2024).

Com base nisso, o processo de evolução energética tem se readequado para um aproveitamento mais eficaz dos recursos disponíveis, sendo necessário considerar os combustíveis fósseis como um retrocesso no contexto atual. A energia eólica, em particular, tem se destacado no caminho para a sustentabilidade. Sabe-se que ela foi inspirada nos moinhos de vento de países orientais, embora existam indícios de um moinho de vento no Egito, datado de aproximadamente 3.000 anos atrás (PINTO, 2009).

Atualmente, existem diversos modelos de turbinas em uso ao redor do mundo, cada uma com seus criadores e conceitos distintos. No entanto, destacarei o modelo mais utilizado no Brasil, especialmente no Rio Grande do Norte: as turbinas AW-125 e AW-116 (ABEEÓLICA, 2017). A primeira a ser implantada no território do Rio Grande do Norte, foi em Macau, cidade localizada a 188 km da Capital, sendo construída pela a Empresa petrolífera Petrobrás para seu próprio consumo em 2004.

A energia eólica é de grande importância tanto no mundo quanto no Brasil, pois contribui significativamente para o desenvolvimento econômico e sustentável do país. Essa forma de geração permite a instalação de turbinas tanto em terra quanto no mar. O estudo sobre a possibilidade de implantar turbinas *offshore* é estratégico, uma vez que os ventos marinhos são mais fortes e constantes em comparação aos terrestres. O Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) já está analisando a instalação de duas turbinas com potência total de 24,5 megawatts. Esse projeto, aguardando acordos com o setor público e locais, como o Ibama, pescadores e empresas salineiras da região, será localizado no Porto

Ilha de Areia Branca, no litoral potiguar. Trata-se do primeiro projeto desse tipo no Rio Grande do Norte e também no Brasil.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade da implementação de torres eólicas *offshore* no litoral do Rio Grande do Norte, buscando maximizar o aproveitamento dos recursos eólicos de forma sustentável. O estudo pretende avaliar a capacidade de instalação de turbinas em alto-mar, levando em consideração os impactos sobre o ecossistema local, o comércio e a comunidade.

Objetivo Geral

- Analisar a viabilidade da implementação de torres eólicas offshore no litoral potiguar, visando maximizar o aproveitamento dos recursos eólicos de forma sustentável.

Objetivos Específicos:

- Avaliar a capacidade de instalação de turbinas eólicas em alto-mar, considerando os impactos sobre o ecossistema local.
- Realizar o levantamento dos projetos de geração de energia atualmente em processo de licenciamento no estado do Rio Grande do Norte, com a estimativa da respectiva capacidade de produção instalada prevista.
- Revisar os tipos de fundações e estruturas adotados nos empreendimentos em licenciamento, considerando suas características técnicas e adequação às condições geotécnicas e ambientais.

2 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE AEROGERADORES

2.1 FATOR DE CAPACIDADE EÓLICA

A compreensão da produção de energia e da eficiência associada à geração eólica é de fundamental importância, especialmente considerando os elevados custos envolvidos na implantação de parques eólicos. Diante disso, torna-se essencial maximizar a produção energética ao mesmo tempo em que se buscam formas de reduzir os gastos operacionais e de infraestrutura. (RENOVABLES BLOG, 2025).

Nesse contexto, o fator de capacidade, nos permite avaliar o desempenho real de cada aerogerador instalado, oferecendo uma estimativa do quanto do potencial do vento está sendo efetivamente convertido em eletricidade. O fator de capacidade é definido como a razão entre a quantidade de energia gerada por uma turbina eólica em um determinado intervalo de tempo e a quantidade máxima de energia que poderia ser produzida caso a turbina operasse em sua capacidade nominal durante todo esse período. Tal indicador permite uma análise mais precisa da eficiência operacional e do aproveitamento do recurso eólico disponível em uma determinada localidade. (RENOVABLES BLOG, 2025).

2.2 CARACTERÍSTICAS DE VENTO

2.2.1 Origem do Vento

Os ventos são fenômenos atmosféricos resultantes da diferença de pressão atmosférica na superfície terrestre, sendo desencadeados, em grande parte, pela radiação solar. A radiação solar incide de forma desigual sobre a superfície do planeta, sendo mais intensa na região equatorial do que nas regiões polares. Essa distribuição desigual de calor provoca um gradiente de pressão atmosférica, que atua como força motriz para o deslocamento do ar. No entanto, além da radiação solar, outros fatores contribuem significativamente para a formação e o comportamento dos ventos, como a rotação da Terra e as características da superfície terrestre, como a rugosidade (VARGAS, 2015).

A rotação da Terra em torno de seu próprio eixo gera a chamada força de Coriolis, que influencia diretamente o movimento das massas de ar. No Hemisfério Norte, essa força provoca o desvio do vento para a direita em relação ao seu sentido original de deslocamento, especialmente perceptível em sistemas de baixa pressão, como os furacões. No Hemisfério Sul, o efeito de Coriolis atua em sentido oposto, desviando o movimento do vento para a esquerda, o que pode ser observado em fenômenos como os ciclones (VARGAS, 2015).

A incidência desigual da radiação solar também causa variações na densidade do ar. Nas regiões equatoriais, onde a superfície terrestre é mais aquecida, o ar torna-se menos denso e tende a ascender, deslocando-se em direção às regiões polares, onde o ar é mais frio e denso. Esse processo de circulação atmosférica global contribui para o equilíbrio térmico do planeta e está diretamente relacionado à dinâmica dos ventos em escala global (VARGAS, 2015).

2.2.1 Velocidade de corte inferior (*cut-in*) e superior (*cut-out*)

As velocidades de corte inferior *cut-in* e superior *cut-out* representam limites operacionais fundamentais para a geração de energia eólica. A velocidade de corte inferior define o valor mínimo de velocidade do vento necessário para que o aerogerador inicie a conversão da energia cinética em energia elétrica. Quando a velocidade do vento se apresenta abaixo desse limite, a geração de energia torna-se inviável, uma vez que não há força suficiente para acionar a rotação das pás do rotor (SOMBRA, Andresa Kelly Ribeiro, 2025).

A velocidade de corte superior, denominada *cut-out*, corresponde ao limite máximo de velocidade do vento em que o aerogerador pode operar de forma segura. Quando os ventos ultrapassam esse valor, o sistema é automaticamente desligado como medida de proteção, a fim de evitar danos estruturais e mecânicos aos componentes da turbina. Ventos excessivamente intensos podem provocar desgaste acelerado, sobrecarga nos sistemas e comprometer a integridade do aerogerador, tornando a operação inviável e economicamente desvantajosa. Dessa forma, o controle em torno da velocidade *cut-out* é essencial para garantir a durabilidade e segurança do equipamento (SOMBRA, Andresa Kelly Ribeiro, 2025).

2.2.2 Classe de vento

A classificação de ventos é um parâmetro fundamental na avaliação do potencial energético de uma determinada região para a implantação de turbinas eólicas. Essa classificação baseia-se na velocidade média dos ventos, e sua determinação é realizada por meio de estudos técnicos conduzidos em conjunto por engenheiros, meteorologistas e projetistas de parques eólicos. A exemplificação, considera-se frequentemente a velocidade média anual dos ventos a uma altura de 50 metros, com as classes de vento definidas da seguinte forma:

- Classe I: velocidade média superior a 8,5 m/s, sendo considerada ideal para geração de energia eólica em larga escala, devido ao alto potencial energético disponível.
- Classe II: velocidade entre 7,5 e 8,5 m/s, ainda altamente favorável à geração de energia, com bom rendimento dos aerogeradores.

- Classe III: velocidade variando entre 6,5 e 7,5 m/s, caracterizando um potencial energético considerado razoável a bom, dependendo da tecnologia empregada.
- Classe IV: velocidade média entre 5,5 e 6,5 m/s, onde o potencial é moderado e tecnicamente limitado, exigindo análises mais criteriosas de viabilidade.
- Classe V: velocidade inferior a 5,5 m/s, sendo geralmente considerada inviável para geração de energia, pois os aerogeradores estariam sujeitos a maior desgaste com baixa produtividade, comprometendo a viabilidade econômica do projeto.

Esse tipo de classificação é essencial para orientar decisões técnicas e econômicas no desenvolvimento de projetos de energia eólica, garantindo que os aerogeradores sejam instalados em locais que ofereçam condições adequadas de operação e eficiência. Ressaltando que isso varia de acordo com as turbinas onde alguma apresenta maior eficiência a outras, então com isso geram mais que as outras a determinadas ocasiões. (EPE 2025b).

2.3 FAIXA DE TEMPERATURA OPERACIONAL

As turbinas eólicas offshore são desenvolvidas para operar com eficiência dentro de uma faixa de temperatura previamente estabelecida, a fim de preservar o desempenho e a integridade dos seus componentes. Essa faixa de temperatura operacional pode variar conforme as condições climáticas da região onde o sistema está instalado. Tomando como referência os aerogeradores da fabricante *Vestas*, observa-se que os limites de funcionamento normalmente situam-se entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Temperaturas abaixo do limite inferior podem causar congelamento de componentes internos, especialmente daqueles que contêm fluidos, como sistemas hidráulicos e de lubrificação. Já a exposição a temperaturas superiores ao limite máximo pode provocar dilatações térmicas excessivas, comprometendo peças metálicas, além de causar sobreaquecimento em sistemas eletrônicos e falhas nos mecanismos operacionais. Dessa forma, a consideração da faixa térmica adequada é essencial para garantir a segurança, a durabilidade e o desempenho ideal das turbinas eólicas offshore. (VESTAS 2025a)

2.4 ROTOR

Com diâmetros variando entre 20 e 170 metros conforme a figura 1, destaca-se o componente conhecido como nariz da turbina, estrutura que conecta as pás ao eixo principal da torre. Essa parte pode atingir até 33 toneladas e desempenha um papel essencial no controle da operação do aerogerador. Entre suas funções está a atuação como freio

aerodinâmico, mecanismo utilizado para interromper a rotação das pás em situações adversas, como ventos excessivos ou insuficientes. Essa medida visa proteger a integridade estrutural da torre, bem como evitar a operação ineficiente do sistema, especialmente quando a energia gerada não compensa os custos envolvidos na manutenção do funcionamento da turbina (SILVA, 2025).

Figura 1: Detalhe frontal de um aerogerador horizontal, destacando o rotor, responsável pela captação da energia cinética dos ventos e conversão em energia mecânica.



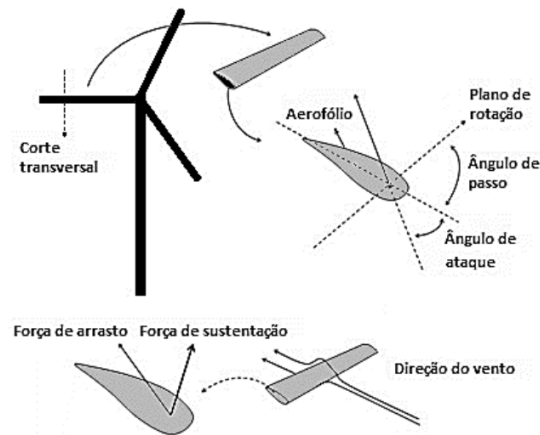
Fonte: PIXABAY (2025).

2.4.2 Freio aerodinâmico (*Brake*):

Conforme mencionado no tópico anterior, é ilustrado na figura 3, o sistema de controle da turbina é responsável por regular a velocidade de rotação das pás. Em situações de ventos excessivamente fortes, é possível ajustar a inclinação das lâminas (ângulo de passo) de modo a reduzir a captação de energia do vento, evitando assim a sobrecarga e possíveis danos estruturais à turbina. Da mesma forma, em condições de ventos fracos, o sistema pode interromper a rotação das pás, a fim de evitar o desgaste desnecessário dos componentes mecânicos, uma vez que, nesses casos, a produção de energia seria ineficiente ou economicamente inviável (SILVA, 2025).

2.4.3 Pás (blades):

Figura 2 - Funcionamento das pás conforme direções de vento e *Pitch*.



Fonte: adaptado de Silva (2025).

As pás dos aerogeradores são componentes fundamentais na conversão da energia eólica em energia mecânica. Elas são construídas com geometria aerodinâmica cuidadosamente projetada, permitindo que aproveitem de forma eficiente a força dos ventos. O funcionamento baseia-se no princípio da diferença de pressão, semelhante ao observado nas asas de aviões, promovendo a rotação do rotor a partir do escoamento do ar. Em turbinas de grande porte, essas estruturas podem alcançar comprimentos superiores a 100 metros (SILVA, 2025)

No sistema de controle por ângulo de passo, a inclinação das pás pode variar de 0° até aproximadamente 35° , podendo alcançar 90° em situações específicas de frenagem aerodinâmica de acordo com a figura 2 (SILVA, 2025)

2.4.4 Nacele

A nacele representa a parte mais pesada da estrutura de uma turbina eólica, podendo ultrapassar 100 toneladas. Devido ao seu elevado peso, o transporte da nacele desde o local de fabricação até o local de instalação apresenta desafios logísticos. Por essa razão, torna-se fundamental a realização de estudos logísticos detalhados previamente ao seu traslado. Essa estrutura abriga componentes essenciais para o funcionamento do aerogerador, tais como a caixa de transmissão, o transformador, entre outros sistemas para a conversão da energia cinética do vento em energia elétrica. Ademais, a nacele também é utilizada como espaço de acesso para as equipes técnicas realizarem inspeções e manutenções nos aerogeradores (SILVA, 2025).

2.5 SISTEMA ELÉTRICO

2.5.1 Conversor de Frequência (50/60 Hz)

Os dispositivos de conversão de frequência são de extrema importância para os sistemas eletrônicos, pois possibilitam a operação de equipamentos que geram energia em uma determinada frequência e permitem sua conversão para outra. No caso das turbinas eólicas, a frequência da energia gerada está diretamente relacionada à velocidade de rotação das pás, que varia de acordo com a intensidade do vento. Por outro lado, a frequência da rede elétrica é constante, fixada em 50 ou 60 Hz, dependendo do sistema local. Dessa forma, o conversor de frequência possibilita que a turbina opere em sua velocidade ideal, independentemente das variações do vento, sem a necessidade de sincronização direta com a frequência da rede elétrica (NUMBER ANALYTICS, 2025).

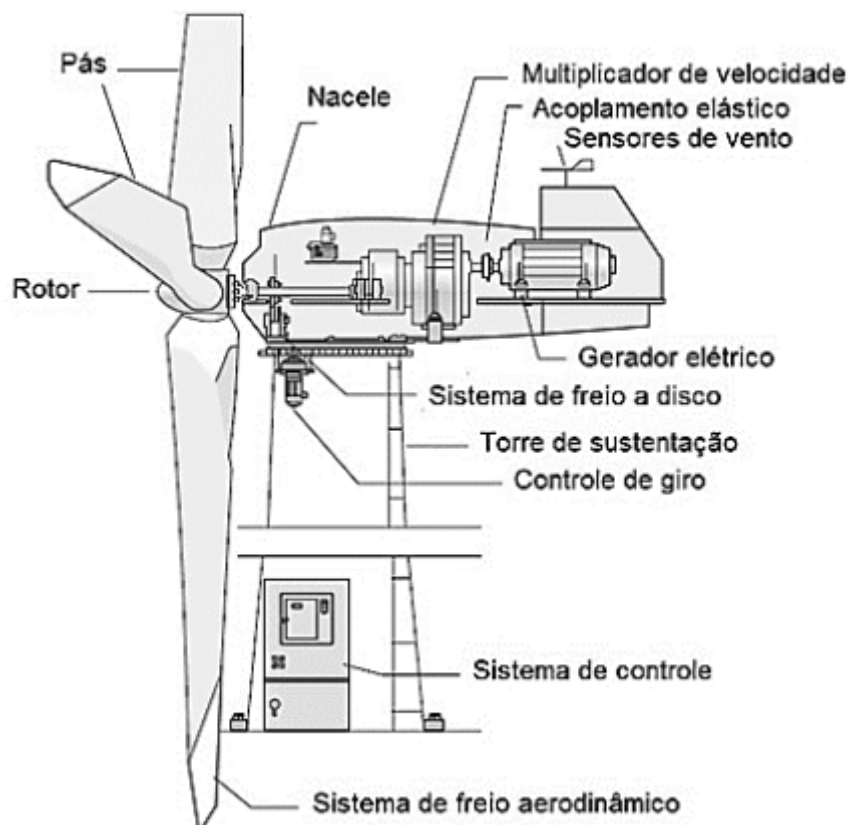
2.6 CAIXA DE VELOCIDADES (*gearbox*)

A caixa de velocidade tem um papel essencial no funcionamento do aerogerador, sendo responsável por elevar a rotação do eixo do rotor a níveis compatíveis com a exigência do gerador elétrico. As pás do rotor giram em baixas velocidades, geralmente entre 10 e 20 rotações por minuto (rpm), o que não é suficiente para a produção eficiente de energia elétrica. Como os geradores convencionais operam de forma ideal em faixas de rotação entre 1000 e 1800 rpm, a caixa de velocidade atua como um sistema multiplicador, transformando a rotação reduzida do rotor em uma rotação elevada, permitindo assim o aproveitamento adequado da energia captada pelo vento (SILVA, 2025).

2.7 TORRE (*tower*)

A torre da turbina eólica é o componente responsável por sustentar toda a estrutura do aerogerador, servindo como base para a nacelle, que é instalada em sua extremidade superior. Por se tratar da parte mais alta da turbina, sua altura exerce influência direta na eficiência do sistema, uma vez que, em altitudes maiores, os ventos tendem a apresentar velocidades mais elevadas e estáveis, o que favorece a geração de energia elétrica. As torres são comumente fabricadas em aço. No entanto, em projetos que exigem grandes alturas, é comum o uso de estruturas conjugadas, combinando aço e concreto. Além disso, essas torres recebem revestimentos com tintas anticorrosivas, especialmente em ambientes mais agressivos, como regiões litorâneas ou offshore, garantindo maior vida útil ao equipamento (SILVA, 2025).

Figura 3 - Componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal.



Fonte: adaptado de Silva (2025).

3 ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE*

3.2 ENERGIA EÓLICA *ONSHORE*

A energia eólica tem origem na ideia de utilizar os ventos como principal forma de obtenção de energia elétrica. Desde as civilizações antigas, o vento já era aproveitado como fonte de trabalho mecânico, sendo utilizado para moer grãos, impulsionar embarcações à vela e bombear água para irrigação. No entanto, o uso da energia eólica com fins elétricos só começou no final do século XIX. Em 1887, o escocês James Blyth instalou a primeira turbina eólica doméstica para geração de eletricidade. Cerca de um ano depois, em 1888, nos Estados Unidos, Charles Brush desenvolveu uma turbina de 12 kW, sendo considerada a primeira aplicação elétrica significativa da energia eólica onshore (PINTO, 2025).

Já no século XX, a tecnologia eólica começou a se desenvolver com mais força. Em 1931, a União Soviética instalou a primeira turbina eólica conectada à rede pública, o que representou um grande avanço. Posteriormente, os Estados Unidos inauguraram a turbina Smith-Putnam, com capacidade de 1,25 MW, marcando a viabilidade da geração eólica em grande escala. Com a crise do petróleo nas décadas de 1970 e 1980, houve um aumento no interesse por fontes alternativas de energia, e a Dinamarca se destacou no desenvolvimento de turbinas mais eficientes e confiáveis. Foi nesse período que se consolidou o modelo de turbinas com três pás, padrão que se mantém até hoje (PINTO, 2025).

No contexto global atual, a energia eólica onshore ocupa posição de destaque entre as fontes renováveis. Em 2024, representou cerca de 825 GW de um total de 960 GW de capacidade instalada em energia eólica no mundo — os outros 135 GW correspondem à geração offshore. A China lidera este segmento, seguida pelos Estados Unidos, Alemanha e Reino Unido. Em alguns países, a energia eólica já representa mais de 20% da matriz elétrica. No caso do Brasil, a fonte superou os 30 GW de capacidade instalada, com predominância na região Nordeste, contribuindo significativamente para a redução do uso de combustíveis fósseis. Embora ainda estejamos longe de uma transição energética completa, a energia eólica tem proporcionado ao país uma maior independência energética (CANAL ENERGIAS, 2025).

3.2.1 ASPECTOS CONCEITUAIS

A energia eólica *offshore* representa uma oportunidade significativa para a geração de eletricidade de forma sustentável, com os ventos em áreas marítimas. Essa modalidade de produção energética contribui para a preservação do espaço terrestre, reduzindo a necessidade de desmatamento e ocupação de áreas em *onshore*, o que resulta em menor impacto visual e ambiental. Além disso, devido à maior intensidade e constância dos ventos em alto-mar, os aerogeradores *offshore* apresentam maior eficiência operacional em comparação aos modelos *onshore*. Essa eficiência permite a produção de elevada geração de energia com um número reduzido de turbinas, contribuindo para o atendimento das demandas energéticas atuais sem a necessidade de grandes extensões territoriais ocupadas ou alta densidade de equipamentos (ARONNE 2025).

O Brasil apresenta um potencial técnico elevado para a geração de energia eólica *offshore*, principalmente em razão de seu extenso litoral, que se estende por mais de 7.000 quilômetros. Estimativas indicam que esse potencial pode alcançar até 700 GW de capacidade instalada, o que representa uma oportunidade estratégica para diversificação da matriz energética nacional. No entanto, esse cenário ainda se encontra em fase inicial de desenvolvimento, com projetos restritos a estudos técnicos, análises de viabilidade e etapas regulatórias, sem implantação comercial efetiva até o momento (ARONNE 2025).

3.2.2 Potencial Eólico

O potencial eólico refere-se à capacidade de uma determinada região em gerar energia a partir da força dos ventos, sendo um dos principais indicadores na viabilidade de projetos de geração de energia eólica. Esse potencial está diretamente relacionado à quantidade de energia cinética disponível no local de instalação das turbinas eólicas, a qual depende fundamentalmente da velocidade e da frequência dos ventos. A velocidade do vento, em particular, é um fator crucial, uma vez que constitui a principal variável responsável pela conversão da energia cinética em energia mecânica, que por sua vez é transformada em energia elétrica por meio do sistema gerador das turbinas (B2FINANCE, 2025).

3.2.3 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull, amplamente utilizada na estatística aplicada à engenharia, especialmente na análise da resistência de materiais, teve seus fundamentos iniciais explorados por Tippet e Fisher em 1928. No entanto, foi o engenheiro sueco Waloddi Weibull quem, em 1939, desenvolveu de forma independente o modelo que levaria seu nome, ao aplicá-lo em estudos experimentais sobre falhas mecânicas. Desde então, a distribuição tornou-se uma ferramenta estatística de referência, notadamente eficaz na modelagem de variáveis associadas à durabilidade e confiabilidade estrutural, com destaque para sua aplicação em análises.

O modelo estatístico da distribuição de Weibull, é amplamente utilizado na análise de viabilidade para a instalação de turbinas eólicas. Essa etapa inicial é essencial para a compreensão do comportamento e da intensidade dos ventos no local, sendo considerada a base para o dimensionamento e a implementação eficiente dos aerogeradores. A equação (1) apresenta a função densidade de probabilidade de Weibull (SILVA, 2025).

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v_m}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v_m}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

em que:

- $f(v)$ é a probabilidade de assumir uma certa velocidade de vento v ;
- o parâmetro v_m é o valor médio de v ;
- c é a escala de distribuição, diretamente ligada ao valor médio;
- k é a forma da distribuição, a qual está diretamente ligada ao desvio padrão:

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_m}\right)^{-1,086} \quad (2)$$

$$v_m = c \gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3)$$

onde γ é a função gama:

$$\begin{aligned} \gamma &= \int_0^{\alpha} \exp(-t) t^{x-1} dt \\ &= (\sqrt{2\pi x}) (x^{x-1}) \exp(-x) \left(1 + \frac{1}{12x} + \frac{1}{288x^2} - \frac{1}{51840x^3} + \dots\right) \end{aligned} \quad (4)$$

A distribuição de Weibull se reduz à distribuição de Rayleigh quando os parâmetros c e k assumem valores específicos:

$$k = 2 \quad (5)$$

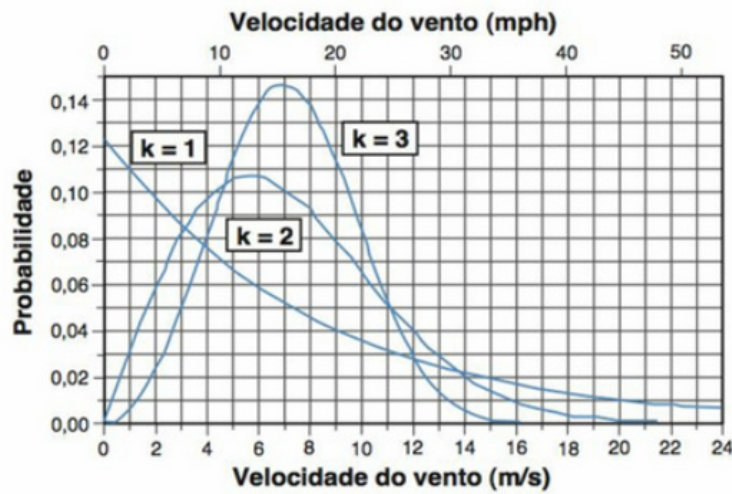
$$c = \frac{2v_m}{\sqrt{\pi}} \quad (6)$$

de forma que:

$$f(V) = \frac{2v_m}{c^2} \exp\left[-\left(\frac{v_m}{c}\right)^2\right] \quad (7)$$

Exemplo:

Figura 4: Gráfico da distribuição de Weibull



Fonte: Adaptado de (PINTO, 2025).

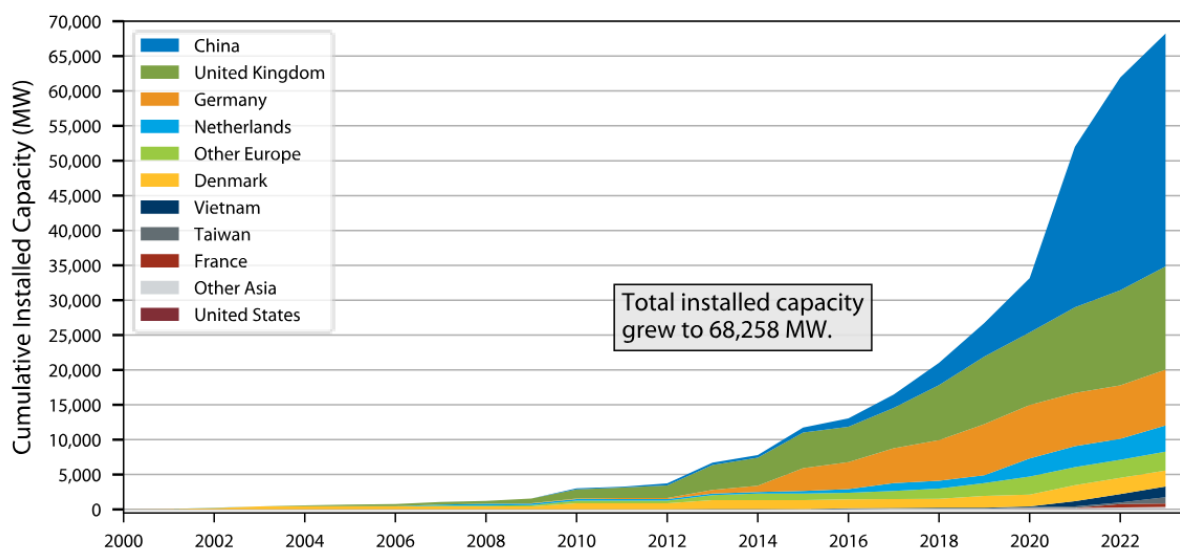
A função densidade de probabilidade obtida possibilita a estimativa da ocorrência de distintas faixas de velocidade do vento na localidade analisada, figura 4 configurando-se como uma ferramenta fundamental para a caracterização do recurso eólico e para a previsão do potencial de geração de energia elétrica por meio de aerogeradores (PINTO, 2025).

3.2 ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NO MUNDO

A energia eólica *offshore* tem apresentado crescimento exponencial nas últimas duas décadas, refletindo o avanço tecnológico e o aumento dos investimentos em fontes renováveis de grande escala. A Figura 5, de acordo com dados de 2024 do centro de pesquisa estadunidense *National Renewable Energy Laboratory* - NREL (NREL, 2025), mostra a evolução da capacidade instalada global cumulativa de energia eólica *offshore* entre os anos 2000 e 2023, alcançando um total de 68.258 MW. Destaca-se o protagonismo da China,

especialmente a partir de 2020, seguida pelo Reino Unido e Alemanha. O gráfico evidencia também a crescente participação de outros países europeus, como Holanda e Dinamarca, além do avanço recente de nações asiáticas como Vietnã e Taiwan. A entrada dos Estados Unidos no mercado *offshore*, embora ainda tímida, é perceptível nos últimos anos do gráfico.

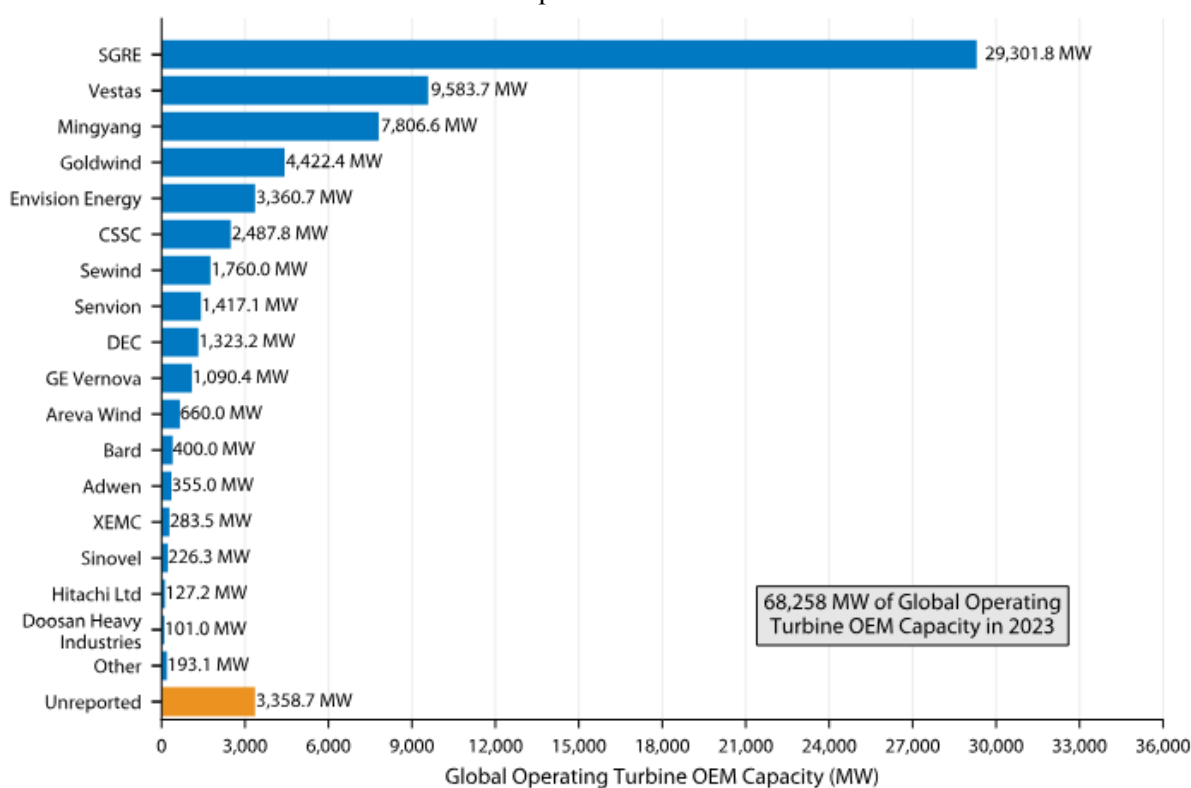
Figura 5 - Capacidade instalada global cumulativa de energia eólica *offshore*.



Fonte: adaptado de NREL (2025).

Com relação ao mercado de fabricantes de turbinas eólicas *offshore*, ainda de acordo com dados da NREL mostrados na figura 6, a empresa hispano-alemã Siemens Gamesa Renewable Energy (SGRE) lidera amplamente o mercado com uma participação de 49,2% da capacidade operacional global, totalizando 29.301,8 MW. A segunda maior participação de mercado pertence à dinamarquesa Vestas, com 9.583,7 MW instalados, representando aproximadamente 14% da capacidade global. Logo em seguida, destacam-se os fabricantes chineses Mingyang e Goldwind, com 7.806,6 MW (11,4%) e 4.422,4 MW (6,5%) respectivamente. A chinesa Envision Energy completa o grupo dos cinco principais fabricantes com 3.360,7 MW, equivalente a 4,9% do total. Esses dados evidenciam a presença significativa de empresas europeias e asiáticas no cenário *offshore*, sinalizando uma diversificação geográfica do setor.

Figura 6 - Participação de mercado de fabricantes de turbinas eólicas *offshore* para projetos operacionais.



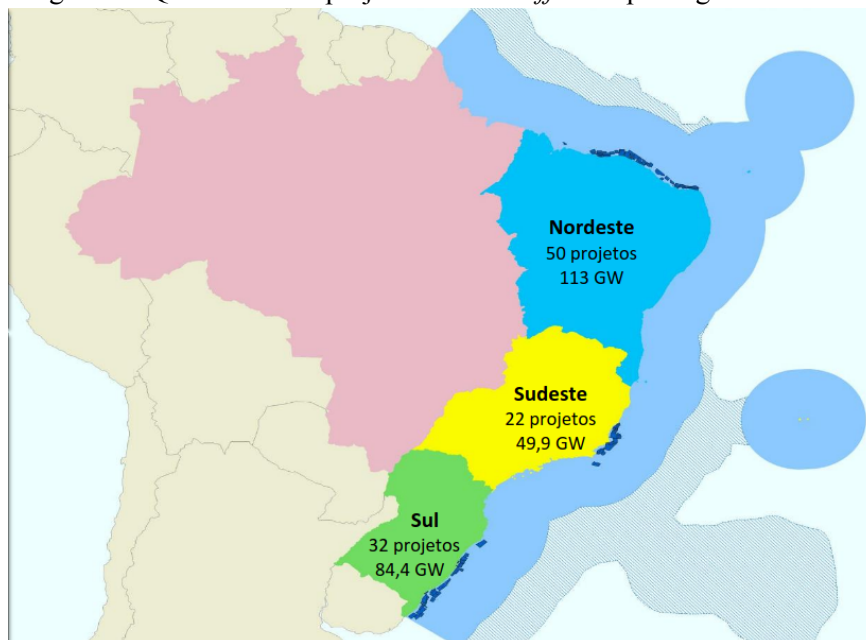
Fonte: adaptado de NREL (2025).

3.3 ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NO BRASIL

As Figuras 7 e 10 apresentam a região litorânea brasileira com potencial para implantação de parques eólicos *offshore* (IBAMA, 2025a). No nordeste, nesta região existem cerca de 50 projetos com capacidade instalada total estimada em 113 GW de geração anual de energia. No Rio Grande do Norte, concentram-se 14 projetos, representando 25,4 GW de capacidade instalada anual, paralela à linha de costa de aproximadamente 6,8 km². A maior concentração de projetos encontra-se nessa faixa de distância. O Ceará com 26 projetos de implementação com capacidade de geração anual de 63,4 GW, seguido por Piauí com 15 GW,

e por fim temos o Maranhão com apenas 2 projetos de implementação, com geração de 6,17 GW anual. Todos eles estarão distanciados da costa cerca de 10Km a 30 Km.

Figura 7 - Quantidade de projetos eólicos *Offshore* por região do Brasil

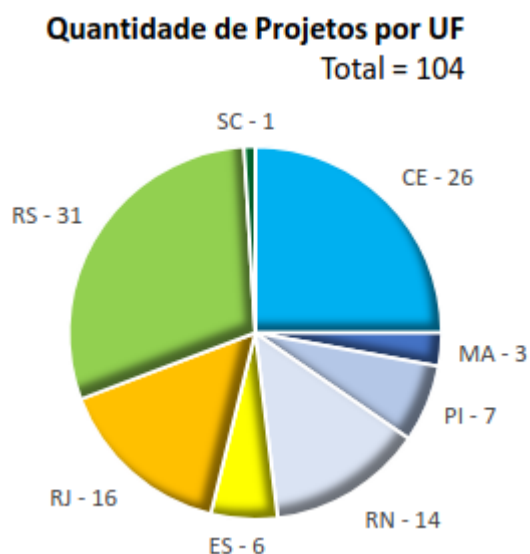


Fonte: adaptado de IBAMA (2025a).

Na sequência, observa-se a Região Sudeste, que concentra 22 projetos de geração de energia, totalizando uma capacidade instalada de 49,9 GW. Dentre os estados da região, apenas o Rio de Janeiro e o Espírito Santo figuram como responsáveis pela implementação dessas tecnologias. O estado do Rio de Janeiro destaca-se com 16 projetos, os quais somam uma potência prevista de 38,7 GW. Em segundo lugar, o Espírito Santo contará com 6 projetos, que juntos deverão gerar 11,2 GW.

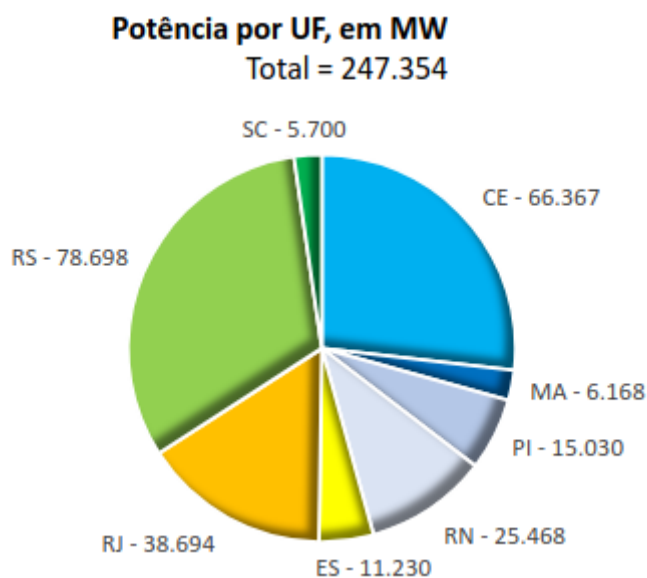
Como se observa na figura 4, na Região Sul do Brasil, identificam-se aproximadamente 32 projetos voltados à geração de energia, totalizando uma capacidade instalada de 84,4 gigawatts (GW). O estado do Rio Grande do Sul concentra a maior parte desses empreendimentos, com 31 projetos, posicionando-se como a unidade federativa com o maior número de projetos no país, e uma potência estimada em 78,7 GW. Em contraste, o estado de Santa Catarina apresenta apenas um projeto em fase de implantação, com capacidade de geração de 5,7 GW, sendo, portanto, o estado com o menor número de projetos no cenário nacional.

Figura 8: Quantidade de projetos de energia eólica *Offshore* por Unidade da Federação



Fonte: adaptado de IBAMA (2025a).

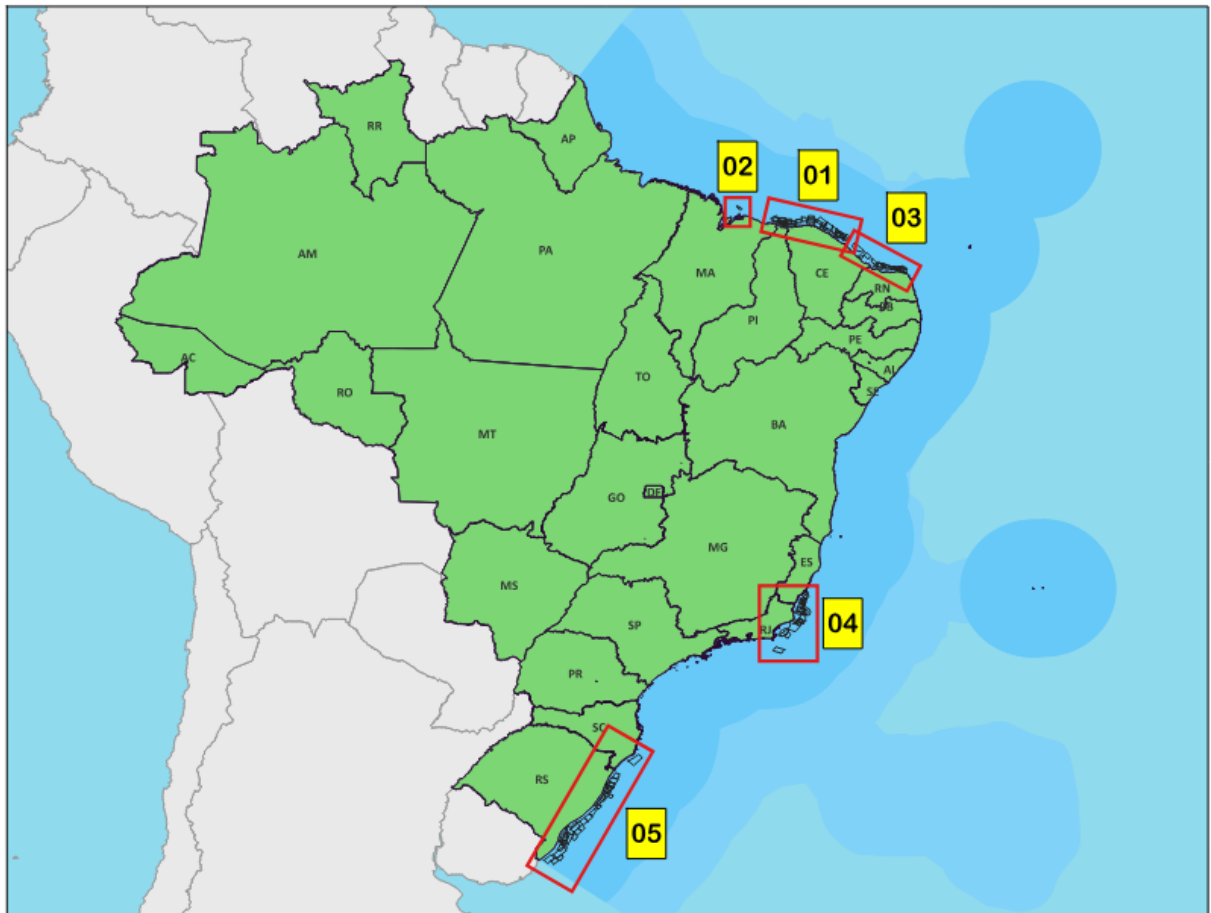
Figura 9 - Potência instalada de energia eólica *Offshore* por Unidade da Federação



Fonte: adaptado de IBAMA (2025a).

As Figuras 8 e 9 apresentam, de maneira didática, a distribuição da potência por unidade federativa e a respectiva produção de energia gerada. A coloração utilizada nos gráficos segue o mesmo padrão adotado no mapa da Figura 4, localizado acima, a fim de manter a coerência visual e facilitar a compreensão dos dados.

Figura 10: Projetos eólicos *offshore* com processo de licenciamento ambiental aberto no Ibama.

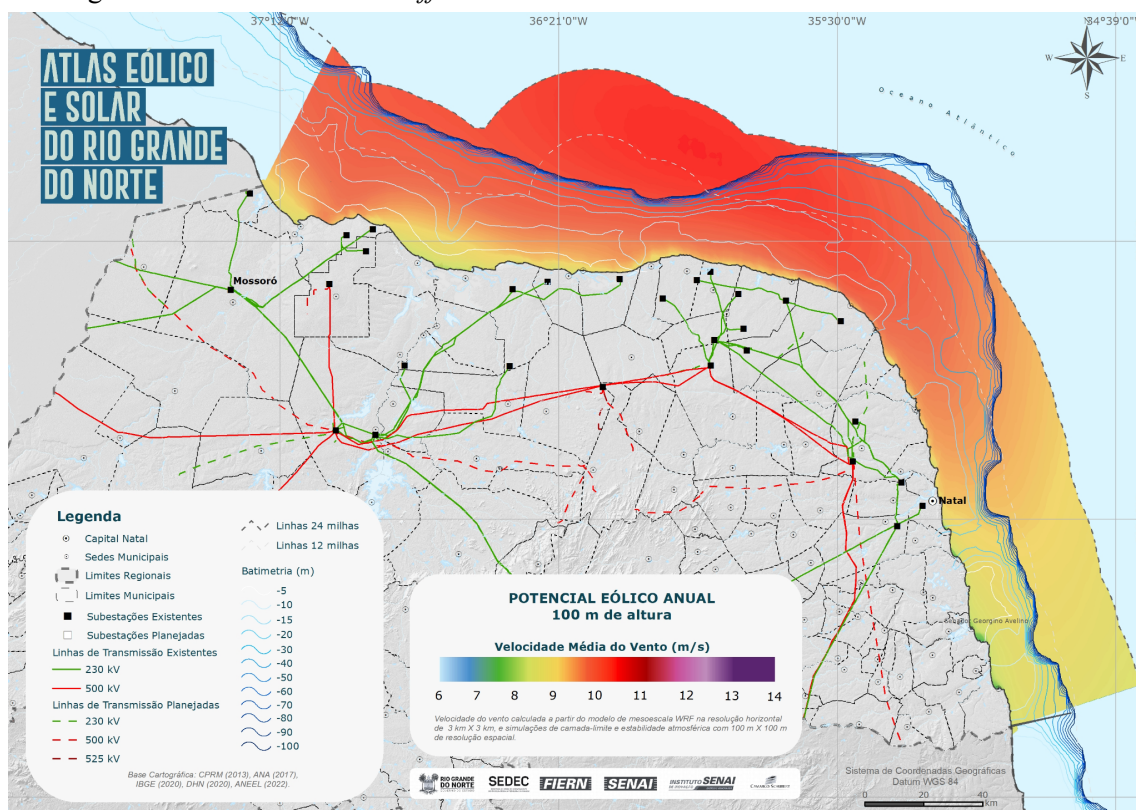


Fonte: adaptado de IBAMA (2025c).

3.4 ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NO RIO GRANDE DO NORTE

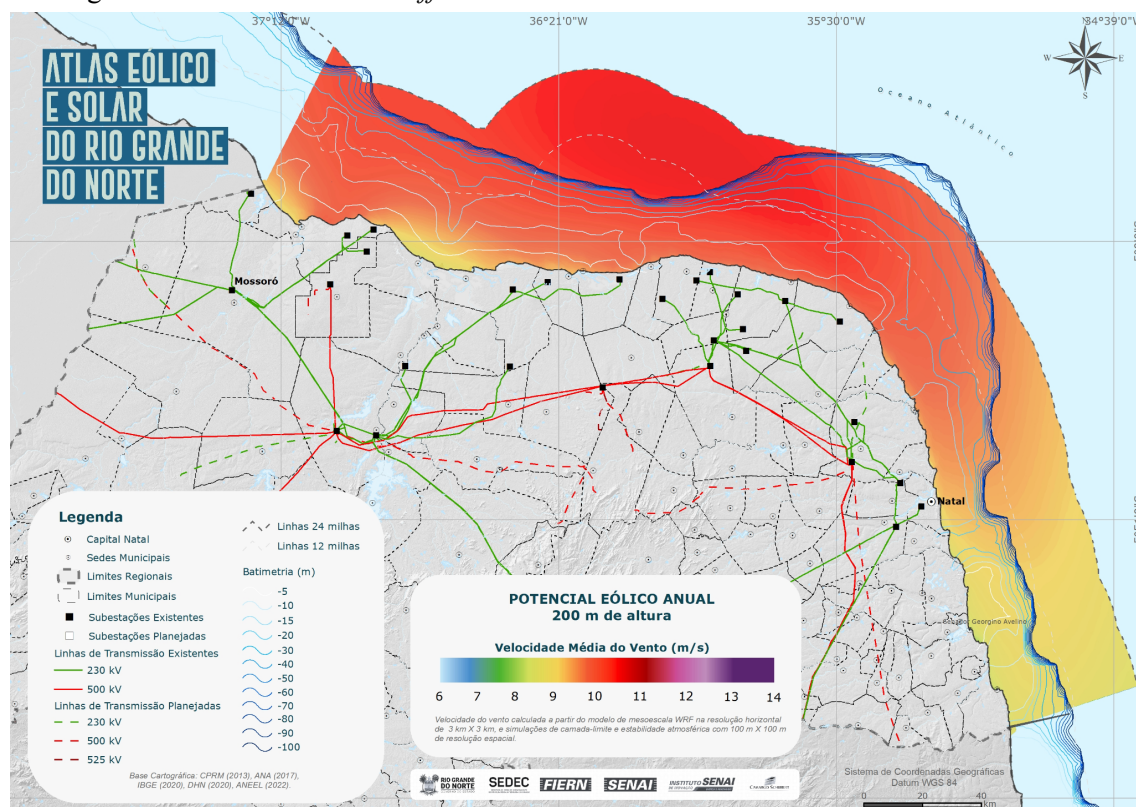
Ao analisar as figuras 11 e 12, observa-se de forma clara as regiões do Rio Grande do Norte que apresentam maior potencial para geração de energia eólica offshore, considerando alturas de 100 metros e 200 metros. A região norte do estado destaca-se com coloração predominantemente alaranjada, indicando maior velocidade média dos ventos. Dentro dessa área, as cidades de Areia Branca, Porto do Mangue e Macau apresentam elevado potencial eólico a 100 metros de altura. No litoral norte, as cidades de Touros, São Miguel do Gostoso e Rio do Fogo também se destacam conforme o Atlas Eólico e Solar do Rio Grande do Norte. Ao comparar as alturas, nota-se que a coloração alaranjada intensifica-se aos 200 metros, indicando que o potencial eólico aumenta com a elevação da altura das torres, reforçando a atratividade dessas regiões para a implantação de parques eólicos offshore.

Figura 11 - Potencial Eólico *Offshore* Anual do Rio Grande do Norte a 100 m de altura.



Fonte: adaptado de Atlas Eólico e Solar do Rio Grande do Norte, 2025a

Figura 12 - Potencial Eólico *Offshore* Anual do Rio Grande do Norte a 200 m de altura.

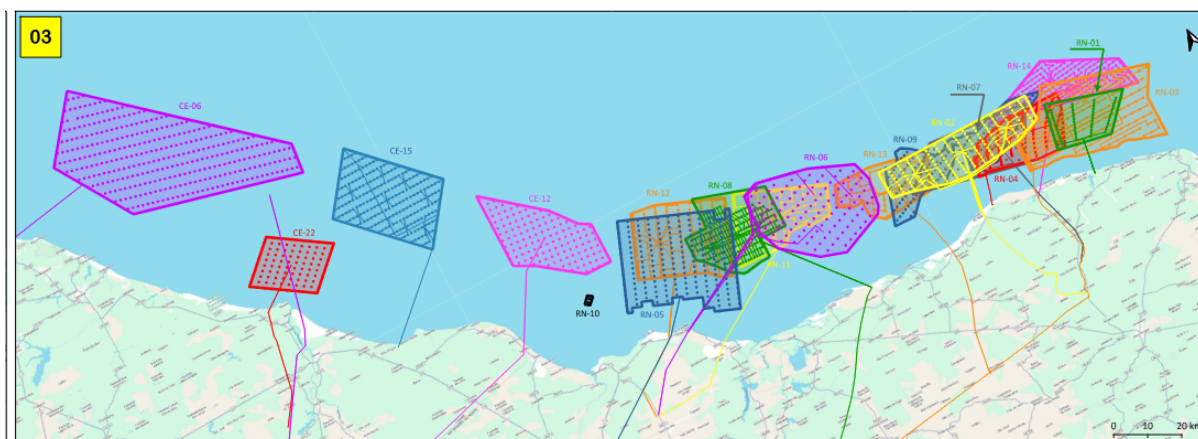


Fonte: adaptado de Atlas Eólico e Solar do Rio Grande do Norte, 2025b.

3.4.1 PROJETOS EM LICENCIAMENTO NO RN

Conforme apresentado na Figura 13, é possível identificar a área proposta para a implementação dos projetos eólicos offshore. Destaca-se o parque RN-10, sob responsabilidade da concessionária SENAI/RN, o qual ainda não possui definição quanto ao modelo de aerogeradores a ser adotado, mas espera que tenha entre 7 a 15 turbinas. Observa-se também que a faixa litorânea do Rio Grande do Norte se estende até o parque RN-01, operado pela concessionária Pedra Grande, que já conta com a previsão de utilização de aerogeradores do modelo Haliade-X GE, distribuídos em um total de 12 turbinas.

Figura 13 - Localização dos campos eólicos *offshore* em processo de licenciamento no Rio Grande do Norte e parte do Ceará.



Fonte: adaptado de IBAMA (2025d).

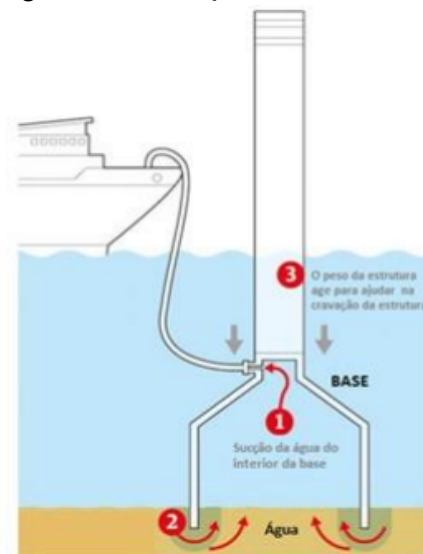
3.5 TIPOS DE FUNDAÇÃO

As figuras 15 e 16, mostram que as fundações utilizadas em torres eólicas *offshore*, desempenham um papel fundamental na estabilidade estrutural e na viabilidade da construção dessas instalações. A escolha adequada do tipo de fundação é essencial, pois influencia diretamente o desempenho técnico, a durabilidade e os custos totais do projeto. Dentre as diversas opções disponíveis no contexto offshore, destacam-se diferentes modelos desenvolvidos com o objetivo de maximizar a eficiência estrutural e, simultaneamente, minimizar os custos de implantação (EPE, 2025).

Um dos principais tipos é a fundação do tipo *Gravity Base*, onde se tem uma base de concreto de forma estrutural para a sua instabilidade, é usada com o princípio da gravidade, sendo apropriadas para águas rasas com o solo plano, com o seu traslado por rebocadores, o custo dessa fundação é bastante baixa (EPE, 2025).

A fundação do tipo *Suction Bucket* baseia-se no princípio da diferença de pressão para sua fixação ao solo marinho. Sua estrutura é oca, e, durante o processo de instalação, posiciona-se a base no local desejado e, com o auxílio de um navio equipado com uma bomba de sucção, realiza-se a retirada da água do interior da fundação. Esse procedimento gera uma diferença de pressão entre o interior e o exterior da estrutura, o que provoca sua penetração no solo de forma controlada. Como resultado, a fundação atinge um estado de completa estabilização, conforme ilustrado na Figura 14 (EPE, 2025).

Figura 14 - Fundação *suction Bucket*



Fonte: adaptado de EPE (2025).

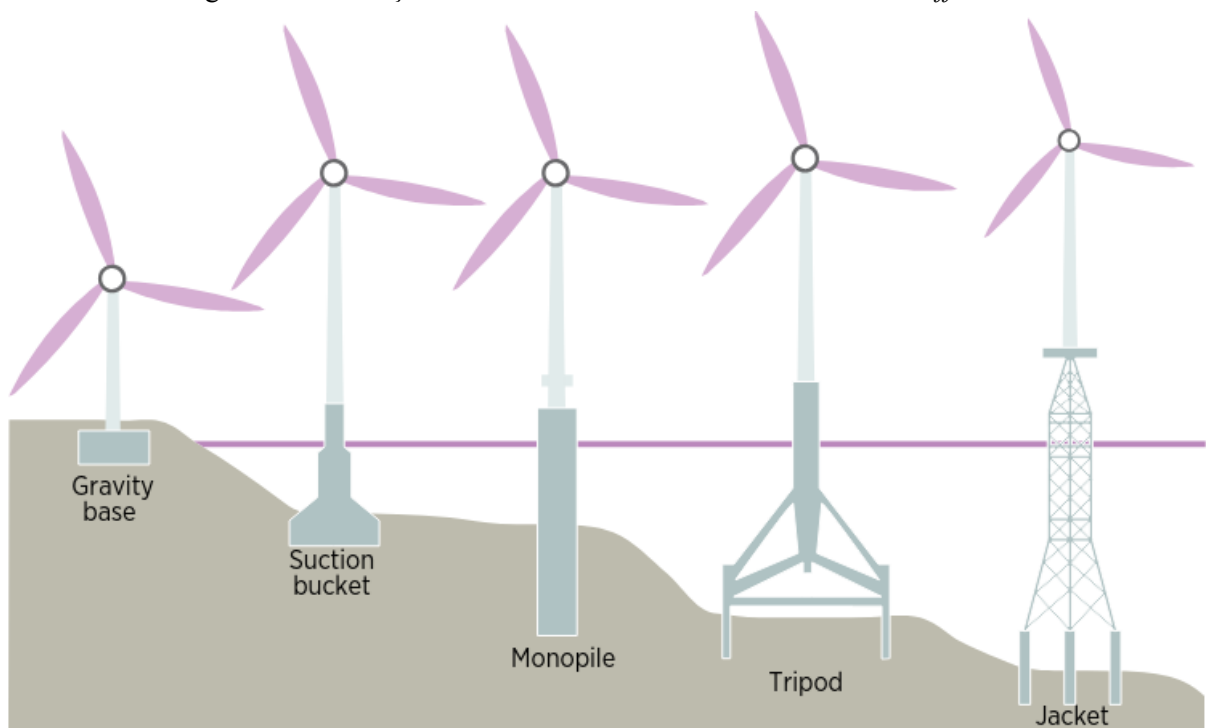
A fundação do tipo *monopile* é atualmente a mais amplamente utilizada em projetos de turbinas eólicas offshore, devido à sua simplicidade construtiva, o que a torna uma opção tecnicamente e economicamente atrativa. Essa fundação consiste em um cilindro metálico oco, geralmente com diâmetro variando entre 3,5 e 4,5 metros, que é cravado no solo marinho. No entanto, sua aplicação apresenta limitações em relação ao tipo de solo: sua eficiência pode ser comprometida em terrenos com grande presença de rochas ou substratos excessivamente pedregosos, nos quais a cravação pode se tornar inviável ou pouco eficaz (EPE, 2025).

A fundação do tipo *tripod* tem sido tradicionalmente utilizada pela indústria petrolífera offshore e, mais recentemente, passou a integrar o cenário da geração de energia eólica em alto-mar (*offshore*). Essa estrutura representa uma combinação entre a fundação *monopile* e a geometria de um tripé. Na configuração do *tripod*, os três apoios inferiores são cravados no leito marinho e rigidamente fixados, garantindo estabilidade estrutural. Na parte superior da estrutura, há uma conexão com um elemento *monopile*, sobre o qual é instalada a

torre da turbina eólica. Essa integração entre diferentes tipos de fundação visa proporcionar maior resistência a cargas dinâmicas e ambientais, tornando-as mais estáveis do que o modelo monopile, tendo como contra indicações o seu traslado e valor econômico, por necessitar de grandes embarcações para sua locomoção. A *tri-ple* segue o mesmo conceito, só que ao invés de ela ter a junção como a monopile abaixo da lâmina de água os tripé se prolongam até em cima da lâmina de água, fazendo sua conectividade diretamente com a torre da turbina (EPE, 2025).

A fundação do tipo *jacket* é amplamente reconhecida por sua confiabilidade estrutural. Trata-se de uma estrutura metálica treliçada, ancorada ao leito marinho por meio de estacas cravadas. Originária da indústria de petróleo e gás *offshore*, essa fundação passou a ser adotada também em projetos de energia eólica marítima. Sua principal vantagem reside na alta resistência a forças hidrodinâmicas, uma vez que o desenho aberto da treliça permite a passagem das ondas com menor resistência, reduzindo o impacto dinâmico sobre a estrutura. Por essas características, a fundação *jacket* é especialmente indicada para aplicações em águas profundas (EPE, 2025).

Figura 15 - Fundações de fundo fixo usadas na indústria eólica *offshore*.



Fonte: adaptado de Moulas et al. (2017).

Tendo ventos mais fortes e constantes em locais mais profundos no mar, estruturas com bases fixas não são mais vistas com bons olhos devido ao alto custo econômico em construir-se, sendo assim vendo as dificuldades, surgem as plataformas flutuantes como

sugestão, tendo as plataformas flutuantes vemos 3 modelos de plataformas, a *Tension leg Platform*, *Spar-Submersible* e *Spar-buoy* (EPE, 2025).

A *Tension Leg Platform* (TLP) é uma estrutura flutuante utilizada em ambientes offshore, caracterizada por sua ancoragem ao fundo marinho por meio de cabos tensionados. Normalmente, são utilizados três ou mais tendões (tension legs), os quais são fixados ao solo oceânico através de sistemas de sucção, garantindo elevada estabilidade vertical à plataforma. Uma das principais vantagens desse tipo de estrutura é a possibilidade de sua pré-montagem em terra firme, permitindo seu transporte integral até o local de instalação. Contudo, essa operação demanda o uso de embarcações especializadas para posicionamento e ancoragem, o que pode aumentar a complexidade e os custos logísticos do projeto. Em termos de aplicabilidade, as TLPs são adequadas para ambientes com profundidades intermediárias, geralmente variando entre 50 e 60 metros, embora existam adaptações para maiores profundidades (EPE, 2025).

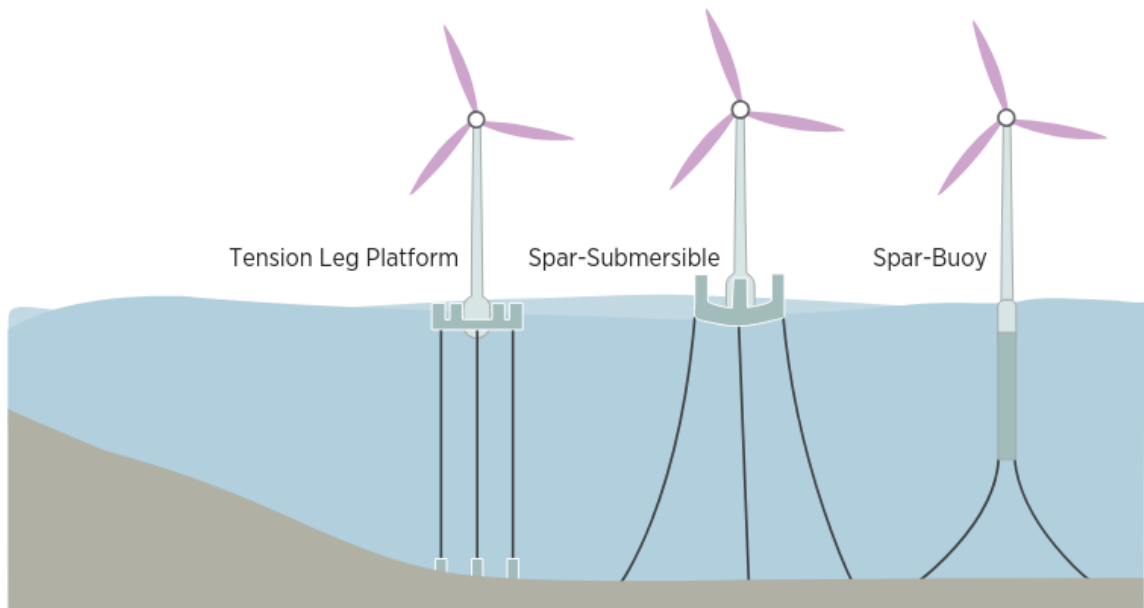
A *Spar-Submersible* é um tipo de plataforma *offshore* que apresenta semelhanças com a estrutura do tipo tripode, especialmente no que se refere ao sistema de ancoragem. Sua fixação é realizada por meio de âncoras ou linhas catenárias, que proporcionam estabilidade lateral e resistência às forças ambientais. A plataforma é composta por uma coluna central alongada, cuja geometria e distribuição de massa conferem elevada estabilidade hidrostática e flutuabilidade, características essenciais para sua operação em águas profundas. Uma das vantagens operacionais desse modelo é a possibilidade de pré-montagem em terra firme, o que simplifica parte do processo construtivo. Posteriormente, a estrutura pode ser rebocada até o local de instalação por meio de embarcações convencionais, como navios rebocadores, reduzindo os custos associados à logística marítima (EPE, 2025).

A plataforma flutuante *Spar-bour*, ela tem a sua geometria bastante simples, contando com um cilindro oco onde é preenchido com água, seu lastreado fornecendo que fique estabilizada abaixo da lâmina marítima, fixada por âncoras ou linhas catenárias, ela pode ser instalada com profundidades de até 100 metros, mas precisa de embarcações que consigam levantar a estrutura, como Navios cargueiro, rebocadores de alta potência entre outros (EPE, 2025).

A plataforma flutuante *Spar-buoy* possui uma geometria simples, composta basicamente por um cilindro oco que é preenchido com água para fins de lastreamento. Esse lastro permite que a estrutura permaneça estabilizada abaixo da lâmina d'água, mesmo em ambientes marítimos sujeitos a variações de carga. Sua fixação ao fundo do mar é realizada por meio de âncoras ou linhas catenárias, garantindo sua posição em operação. A instalação

dessa plataforma é viável em profundidades a partir de 100 metros, sendo adequada para ambientes offshore. No entanto, seu transporte e posicionamento demandam o uso de embarcações capazes de içar ou rebocar a estrutura, como navios cargueiros, rebocadores de alta potência, entre outros tipos de apoio marítimo (EPE, 2025).

Figura 16 - Fundações flutuantes eólicas *offshore*.



Fonte: adaptado de Moulas et al. (2017).

3.6 POSITIVOS E NEGATIVOS

Apresenta diversos aspectos positivos, tais como o aumento da produção de eletricidade, resultante da maior disponibilidade e constância dos ventos na região offshore. Adicionalmente, observa-se menor impacto visual e sonoro em comparação às instalações onshore, bem como a redução das áreas de vegetação e solo afetadas. Outro benefício relevante refere-se ao estímulo da atividade econômica local, com a geração significativa de empregos. Destaca-se que a capacidade instalada dos parques eólicos offshore pode ser aproximadamente três vezes superior a toda capacidade instalada atual com todas as formas de geração.

Por outro lado, a implementação de parques eólicos offshore pode ocasionar impactos ambientais e socioeconômicos relevantes. Entre os efeitos negativos, destacam-se as alterações no comportamento migratório de espécies marinhas, como golfinhos e baleias, devido ao ruído e presença das estruturas. Adicionalmente, existe o risco potencial de vazamentos de óleo durante a instalação e operação dos equipamentos, comprometendo a qualidade ambiental. A atividade pesqueira local pode sofrer redução em sua produtividade, em virtude das restrições e interferências nas áreas de pesca tradicionais. Ainda, mudanças nas rotas comerciais de embarcações podem ser necessárias para evitar as áreas ocupadas pelos parques, acarretando ajustes logísticos e econômicos.

4 METODOLOGIA

Esta pesquisa tem caráter qualitativo e documental, centrando-se na análise da viabilidade da implantação de projetos de energia eólica offshore no litoral do estado do Rio Grande do Norte. Para isso, foram utilizadas fontes oficiais disponibilizadas por órgãos governamentais, com destaque para o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA, 2025b). Por meio da plataforma digital do IBAMA, foram acessadas informações referentes à quantidade de projetos em tramitação, suas respectivas localizações no estado e os critérios ambientais exigidos para o licenciamento. A escolha por esse órgão se justifica por sua relevância e autoridade na regulamentação e fiscalização de empreendimentos que envolvem impactos ambientais no território nacional.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), criada pela Lei nº 10.847 de 2004, é vinculada ao Ministério de Minas e Energia e tem como objetivo a elaboração de estudos e projetos voltados ao planejamento do setor energético nacional. Suas atividades abrangem diversas áreas, como petróleo, gás natural, energia elétrica e biocombustíveis. A EPE também

é responsável pela análise de variáveis técnicas, como o potencial energético de determinadas regiões, exemplificado por meio de dados como a velocidade média dos ventos, a incidência de ventos, entre outros parâmetros relevantes para o aproveitamento energético

Assim, esta pesquisa fundamenta-se na análise de dados secundários obtidos por meio de instituições oficiais, como o IBAMA e a EPE, cuja credibilidade técnica contribui significativamente para a confiabilidade do estudo. A utilização dessas fontes possibilita uma avaliação consistente da viabilidade técnica e ambiental dos projetos eólicos offshore no litoral do Rio Grande do Norte, fornecendo elementos que sustentam as discussões e reflexões desenvolvidas nas etapas posteriores da monografia.

5 RESULTADOS E CONCLUSÕES

5.1 PROJETOS DE PARQUES EÓLICOS *OFFSHORE* DO RIO GRANDE DO NORTE

A Tabela 1 apresenta informações detalhadas referentes às implementações dos parques eólicos, abrangendo as empresas requerentes, os modelos de aerogeradores empregados, a quantidade de torres instaladas e a capacidade de geração de energia associada a cada empreendimento. Para facilitar a compreensão e o referenciamento dos dados obtidos, foi adotado o código identificador RN-07 para designar o respectivo parque eólico.

5.2 ANÁLISE TÉCNICA DE AEROGERADORES

5.2.1 AEROGERADOR V236-15.0 MW

A tabela 2 mostra as especificações técnicas a respeito da turbina eólica de modelo V236-15.0 MWTM (VESTAS, 2025a), mostrado na figura 16, fabricado pela empresa Vestas, onde apresenta o tamanho do rotor com 236 m (raio de pás 118 m), e frequência que opera com um conversor de escala completa que funciona em 50 e 60 Hz. Sua velocidade de corte inferior "trabalho realizado em baixas ondas de vento" acima de 3 m/s a 5 m/s de vento, para conseguir girar as pás; e temos também a velocidade de corte superior, onde temos já um valor bem mais alto para a velocidade do vento, onde temos de 31 m/s, para o seu funcionamento ideal. Velocidades muito acima dessa marca pré-estabelecida, podem vir a ser danificado em sua estrutura, sendo assim temos uma maior conversão de energia devido a altas intensidades de vento em alto mar. As classes de vento IEC S e IEC T são categorias definidas pela *International Electrotechnical Commission* (IEC) para classificar turbinas eólicas com base nas condições de vento que elas podem suportar. IEC S temos categorias de vento referente (V_{ref}) de 42,5 m/s. sendo ideal para locais onde a incidência de ventos não são extremamente fortes mas sendo significativos para a produção da energia; por sua vez o IEC T, foi projetado para fazer oposto, criadas para suportar condições mais severas de vento, sendo seu V_{ref} em torno de 50 m/s, local de implementação, áreas costeiras e locais propícios.

Tabela 1 - Projetos de parques eólicos offshore outorgados no Rio Grande do Norte

Código	Projeto	Concessionária	Data Outorga	Modelo	Capacidade e por Turbina (MW)	Nº de Turbinas	Capacidade Total (GW)
RN-08	Projeto Galinhos	SHELL BRASIL PETRÓLEO LTDA	17/03/2022	SG-14-222-D D	14	215	3,010
RN-05	Beta	BETA WIND ENERGIAS OFFSHORE SPE	30/08/2021	V236-15MW	15	200	3,000
RN-04	Ventos Potiguar	INTERNACIONAL ENERGIAS	03/05/2021	HaliadeX - GE	12	207	2,484
RN-12	Costa Branca II	PETROBRAS	13/09/2023	Não definido	18	117	2,106
RN-02	Maral	VENTOS DO ATLÂNTICO	04/01/2021	NGT236	13,5	149	2,012
RN-09	Ventos do Caiçara	MONEX GERACAO DE ENERGIA S.A.	06/09/2022	Não definido	15	131	1,965
RN-03	Alisios Potiguares	BOSFORD PARTICIPAÇÕES	13/04/2021	V236-15MW	15	123	1,845
RN-06	Água Marinha	BLUEFLOAT ENERGY DO BRASIL LTDA	21/01/2022	WEC 265	20	85	1,700
RN-11	Costa Branca I	PETROBRAS	13/09/2023	Não definido	18	81	1,458
RN-07	Cattleya	BLUEFLOAT ENERGY DO BRASIL LTDA	21/01/2022	WEC 265	20	59	1,180
RN-01	Pedra Grande	PEDRA GRANDE	30/11/2020	Haliade-X - GE	12	52	0,624

RN-10 Sítio de Testes	SENAI/RN	02/01/2023	Não definido	7 e 15	2	0,022
--------------------------	----------	------------	--------------	--------	---	-------

Fonte: IBAMA (2025a).

Tabela 2 - Dados técnicos do aerogerador V236-15.0 MW

Dado técnico	Valor
Potência Nominal	15 MW
Velocidade de corte inferior	3 m/s
Velocidade de corte superior	31 m/s
Classe de Vento	IEC S ou S,T
Faixa de temperatura operacional padrão	de -15°C* a +23°C* com um intervalo de redução de +23°C a +45°C
Diâmetro do rotor	236 m
Área varrida	43.742 m ²
Pás	3 lâminas
Frequência e conversor	50/60 Hz e escala completa
Caixa de velocidade	Velocidade média
Torre, altura dos cubo	Específicas do local
Potência máxima do som	115,3 dB(A)

Fonte: Vestas (2025a).

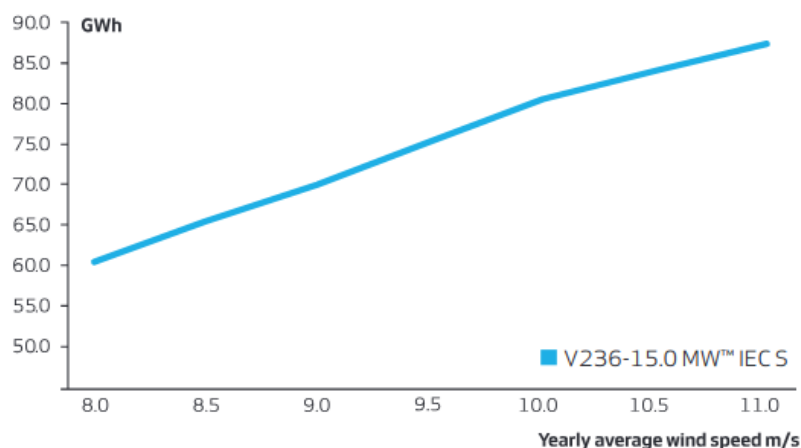
Figura 17 - Aerogerador modelo V236-15.0 MW™ da fabricante Vestas.



Fonte: adaptado de Vestas (2025a).

Os dados apresentados na Figura 18, fornecidos pela Vestas (2025b), representam a produção anual estimada de energia elétrica, em gigawatts-hora (GWh), do aerogerador V236-15.0 MW, em função da velocidade média anual do vento na altura do cubo do rotor (*hub height*). Essa estimativa considera condições ideais de operação, assumindo que a turbina eólica opera de forma isolada, com 100% de disponibilidade ao longo do ano e sem qualquer tipo de perda, seja ela elétrica, mecânica ou aerodinâmica. Adota-se ainda o valor de $\gamma = 2$ para o parâmetro de forma da distribuição de Weibull (VESTAS, 2025b), que descreve a frequência das velocidades do vento ao longo do ano, representando uma situação típica para locais com regime de vento moderadamente distribuído. A densidade do ar considerada é a padrão ao nível do mar, de $1,225 \text{ kg/m}^3$, correspondente a condições atmosféricas a 15°C .

Figura 18 - Gráfico da Produção Anual de Energia do aerogerador V236-15.0 MW



Fonte: Vestas (2025b).

De acordo com os dados apresentados na figura 18 (VESTAS, 2025b), o aerogerador V236-15.0 MW pode produzir cerca de 75 GWh por ano em locais com velocidade média de vento anual de aproximadamente 9,5 m/s. Considerando que o consumo médio mensal por residência é de 150 kWh (ENERGIA, 2025), o que equivale a 1.800 kWh por ano, essa produção anual de energia permitiria abastecer 41.666 residências ao longo de um ano. Portanto, com base nos dados reais de desempenho do equipamento, é possível estimar que um único aerogerador desse modelo seja capaz de suprir as necessidades energéticas anuais de mais de quarenta mil residências.

O parque eólico RN 05, de responsabilidade da empresa Beta Wind Energias offshore SPE, será implantado nas proximidades do litoral da comunidade de Ponta do Mel, localizada entre os municípios de Areia Branca e Porto do Mangue, no estado do Rio Grande do Norte.

O empreendimento contará com aerogeradores com altura total aproximada de 280 metros, considerando a torre e o rotor. De acordo com dados de velocidade média anual do vento no local, estimada em 9,5 m/s a uma altura de 200 metros, é possível estimar uma produção anual de energia na ordem de 75,0 GWh. Considerando a instalação de 200 unidades do aerogerador, conforme a capacidade determinada pela Beta Wind Energias Offshore, a produção energética estimada para o parque eólico alcança aproximadamente 15.000 GWh (15 TWh). O desempenho esperado para o modelo de aerogerador V236-15.0 MW da Vestas. Para estimar o número de residências que poderiam ser abastecidas com a energia gerada pelo parque eólico, parte-se do consumo médio mensal de uma residência, estimado em 150 kWh (ENERGIA, 2025). Multiplicando esse valor pelos 12 meses do ano, obtém-se um consumo anual por residência de 1.800 kWh. Considerando-se a produção anual do parque de 15.000 GWh por ano. Dividindo-se esse montante pelo consumo anual de uma residência, conclui-se que aproximadamente 8.333.333 residências poderiam ser supridas anualmente pela energia gerada pelo parque eólico.

O parque eólico RN 03 será composto por aerogeradores do modelo V236-15.0 MW, da fabricante Vestas, assim como no projeto RN 05. Entretanto, sua implantação será conduzida pela empresa Basford Participações. O empreendimento será localizado no litoral das comunidades de Morro dos Martins e Reduto, situadas entre os distritos de Guajiru e São Miguel do Gostoso, no estado do Rio Grande do Norte. Considerando a velocidade média dos ventos na região, estimada em aproximadamente 10 m/s, e conforme os dados representados na figura 15, a previsão de produção anual de energia por unidade geradora é de aproximadamente 79,0 GWh. Considerando um total de 123 aerogeradores previstos para o empreendimento, a estimativa de geração anual total do parque eólico é da ordem de 9.717 GWh (9,72 TWh). Com base na produção anual de energia estimada para o referido parque, que é de 9.717 GWh, e considerando o consumo médio anual de uma residência, estimado em 1.800 kWh (ENERGIA, 2025), é possível calcular o número de residências que poderiam ser supridas. Dividindo-se o total de energia gerada pelo consumo anual por residência, obtém-se uma estimativa de aproximadamente 5.398.333 residências que poderiam ser atendidas anualmente pela energia produzida pelo parque eólico.

O Boletim Anual 2023 da ABEEólica (Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias) (ABEEÓLICA, 2025), com dados consolidados até dezembro de 2023, indica que a geração eólica *onshore* total do Rio Grande do Norte em 2024 foi de 29,47 TWh. Apenas a produção prevista anualmente, pela nossa análise, dos parques RN 03 e RN 05 totalizam 24,72 TWh, o que demonstra o imenso potencial dos parques eólicos *offshore* no

estado. É imprescindível que haja um investimento maciço no desenvolvimento da estrutura de escoamento dessa energia.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da crescente demanda energética global e da ampliação da conscientização ambiental, torna-se responsabilidade nossa adotar medidas que contribuam para a redução das emissões de carbono no planeta. Nesse contexto, a utilização de fontes renováveis, como a energia eólica, surge como uma alternativa viável e promissora. No entanto, embora represente uma solução sustentável, essa modalidade de geração também impõe desafios ambientais, como a ocupação de grandes áreas para instalação, a emissão de ruídos que, a longo prazo, podem afetar a audição humana e animal, além de interferências em rotas migratórias de aves e outros impactos relacionados à fauna e à saúde.

Considerando que a elevada demanda energética torna inviável a eliminação completa dessa forma de geração, a energia eólica *offshore* passa a se destacar como alternativa estratégica. Por ser instalada no mar, essa tecnologia reduz a poluição visual, diminui a necessidade de desmatamento e preserva áreas terrestres sensíveis. Além disso, apresenta alta capacidade de geração, o que contribui para o aumento da oferta de energia limpa, ao mesmo tempo em que impulsiona benefícios econômicos. Por essas razões, a energia eólica *offshore* tem ganhado visibilidade e reconhecimento como uma solução eficaz para conciliar expansão energética com responsabilidade ambiental.

Conforme previamente analisado, evidencia-se o elevado potencial da indústria eólica *offshore*. Estudos indicam que, para alcançar a mesma geração anual de energia obtida por todos os parques eólicos onshore atualmente em operação, seriam necessários apenas dois parques eólicos offshore equipados com aerogeradores do modelo V236-15.0 MW, da fabricante Vestas, instalados no litoral do Rio Grande do Norte. Essa configuração seria capaz de suprir quase toda a demanda energética atualmente atendida por todos os aerogeradores onshore em funcionamento no estado.

Atualmente, o Rio Grande do Norte concentra 14 propostas de usinas eólicas offshore em análise, que juntas somam cerca de 25,4 GW em capacidade prevista. Esse volume coloca o estado entre os líderes nacionais no setor, ocupando o quarto lugar, atrás apenas do Rio Grande do Sul, Ceará e Rio de Janeiro.

A região do litoral do Rio Grande do Norte, apresenta um cenário ideal para implementação, devido a alta produção e constância dos ventos, como a produção de energia eólica depende desses critérios temos um ambiente bastante propício para a implementação, onde conseguimos em algumas localidades do Rio Grande do Norte ventos com velocidade constante de 9,5 m/s

Considerando apenas os projetos das empresas Bosford Participações e Beta Wind Energias Offshore SPE, ambos utilizando aerogeradores offshore do modelo V236-15.0 MW da fabricante Vestas, estima-se um total de 323 torres eólicas instaladas. Em comparação, a geração *onshore* no Rio Grande do Norte conta atualmente com aproximadamente 2.800 turbinas distribuídas entre 150 parques distintos. A análise comparativa evidencia que um número significativamente menor de turbinas offshore possui potencial para, praticamente, dobrar a capacidade de geração de energia do estado.

Considerando uma capacidade instalada de 24,7 GW e um fator de capacidade médio de 50% para os parques eólicos offshore, estima-se que a geração anual de energia alcance aproximadamente 108 milhões de megawatts-hora (MWh). Com base nessa produção, e utilizando uma média de redução de emissão de dióxido de carbono (CO₂) de 0,6 tonelada por MWh gerado, projeta-se que cerca de 64,8 milhões de toneladas de CO₂ deixem de ser emitidas anualmente em função da utilização dessa fonte renovável de energia.

É essencial que o desenvolvimento da energia eólica *offshore* seja estudada de forma mais aprofundada e não abrir mão do conhecimento técnico e ambiental. A análise desse setor não deve se limitar aos benefícios econômicos e energéticos, mas também considerar os possíveis impactos socioambientais. Observando a necessidade de estudos específicos sobre os efeitos à fauna marinha e às comunidades que dependem da pesca. A partir desses estudos, devem ser propostas e aplicadas medidas de mitigação que garantam a sustentabilidade e a harmonia entre a geração de energia e a preservação dos ecossistemas e modos de vida local.

Para que a energia eólica *offshore* avance no Brasil, é essencial investir em políticas públicas e pesquisas. O mapeamento das áreas com potencial ajuda a identificar onde os parques podem ser instalados com segurança e eficiência. Além disso, incentivos fiscais e apoio financeiro facilitam a entrada de investidores, o que acelera a viabilização dos projetos. Com essas ações, o país pode fortalecer essa fonte renovável e diversificar sua matriz energética de forma sustentável.

REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA. Boletim Anual 2024. 2024. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>. Acesso em: 27 maio 2025.

ARONNE, Roberta. Marco legal das eólicas offshore. Simões Pires, 5 fev. 2025. Disponível em: https://www.simoespieres.com/marco-legal-das-eolicas-offshore/?utm_source. Acesso em: 5 jul. 2025.

B2FINANCE. O potencial eólico e a transição energética: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável. Disponível em: <https://b2finance.com/o-potencial-eolico-e-a-transicao-energetica-desafios-e-oportunidades-p-ara-o-desenvolvimento-sustentavel/>. Acesso em: 16 jun. 2025.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Eólicas offshore: critérios para avaliação de viabilidade ambiental – março de 2025. Brasília: IBAMA, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/arquivos/20250311_Eolicas_Offshore_Ibama_marco_25.pdf. Acesso em: 18 jul. 2025c.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Eólicas offshore: critérios para avaliação de viabilidade ambiental – março de 2025. Brasília: IBAMA, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/arquivos/20250311_Eolicas_Offshore_Ibama_marco_25.pdf. Acesso em: 18 jul. 2025d.

CANAL ENERGIA. Brasil sobe no ranking global de energia eólica e ultrapassa Espanha. Canal Energia, 2025. Disponível em: https://www.canalenergia.com.br/noticias/53315104/brasil-sobe-no-ranking-global-de-energia-eolica-e-ultrapassa-espanha?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 30 jul. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Página institucional. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: 26 jun. 2025b.

ENERGIA, Ministério de Minas e. Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro - Junho / 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/secretaria-nacional-energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2022/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico-jun-2022.pdf>. Acesso em: 6 maio 2025.

EPA, Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle, 2022, <https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle>

EPE. Roadmap Eólica Offshore Brasil: perspectivas e caminhos para a energia eólica marítima. Perspectivas e Caminhos para a Energia Eólica Marítima. 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-456/Roadmap_Eolica_Offshore_EPE_versao_R2.pdf. Acesso em: 10 jun. 2025a.

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama>. Acesso em: 15 jul. 2025b.

IBAMA. Projetos com processo de licenciamento ambiental aberto no IBAMA. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/arquivos/20250311_Eolicas_Offshore_Ibama_marco_25.pdf. Acesso em: 7 maio 2025a.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Renewables*. Paris: IEA, [2025?]. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/renewables>. Acesso em: 10 jul. 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Leveraging the multifunctionality of offshore wind energy. Abu Dhabi: IRENA, 2018. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/May/IRENA_Leveraging_for_Offshore_Wind_2018.pdf. Acesso em: 17 jun. 2025.

MOULAS, D.; SHAFIEE, M.; MEHMANPARAST, A. J. O. E. Damage analysis of ship collisions with offshore wind turbine foundations. *Ocean Engineering*, v. 143, p. 149-162, 2017.

NREL. Offshore Wind Market Report: 2024 Edition. 2024. Disponível em: <https://docs.nrel.gov/docs/fy24osti/90897.pdf>. Acesso em: 27 maio 2025.

NUMBER ANALYTICS. Ultimate Guide: Frequency Converter in Wind Energy. 2023. Disponível em: <https://www.numberanalytics.com/blog/ultimate-guide-frequency-converter-wind-energy>. Acesso em: 28 jun. 2025.

PINHEIRO, André Sousa. Análise técnico-econômica da energia eólica no Ceará. 2016. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energias Renováveis) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/35588/3/2016_tcc_aspinheiro.pdf. Acesso em: 18 jul. 2025.

PINTO, Milton de Oliveira. *Fundamentos de energia eólica*. Rio de Janeiro: Grupo GEN (LTC), 2012. E-book. ISBN 978-85-216-2193-5. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2193-5>. Acesso em: 30 jul. 2025

PIXABAY. Moinho de vento – força do vento. Disponível em: <https://pixabay.com/pt/photos/moinho-de-vento-força-do-vento-2652928>. Acesso em: 31 jul. 2025.

RENOVABLES BLOG. O que significa fator de capacidade na energia eólica?. Disponível em: <https://renovables.blog/pt/poder-do-vento/O-que-significa-fator-de-capacidade-na-energia-eólica%3F>. Acesso em: 16 jun. 2025.

RIO GRANDE DO NORTE. *Atlas Eólico e Solar do Rio Grande do Norte*. Natal: Governo do Estado do RN, 2023. Disponível em: <https://atlaseolicosolarn.com.br/pages/download/download.html>. Acesso em: 18 jul. 2025a.

RIO GRANDE DO NORTE. *Atlas Eólico e Solar do Rio Grande do Norte*. Natal: Governo do Estado do RN, 2023. Disponível em: <https://atlaseolicosolarn.com.br/pages/download/download.html>. Acesso em: 18 jul. 2025b.

RIO GRANDE DO NORTE. Atlas Eólico e Solar do Rio Grande do Norte. Natal: Governo do Estado do RN, [202-]. Disponível em: <https://atlaseolicosolarn.com.br/pages/download/download.html>. Acesso em: 18 jul. 2025.

SILVA, Kátia Rejane Viana da. **Geração hidrelétrica e eólioelétrica: estratégias para o uso sustentável da água e do vento**. Fortaleza: Imprensa Universitária da UFC, 2019. Disponível em: <https://imprensa.ufc.br/wp-content/uploads/2021/07/2019-geracao-hidroeletrica-e-eolioeletrica.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2025.

SOMBRA, Andresa Kelly Ribeiro. **Emulação dinâmica de uma turbina eólica utilizando um MIT com controle vetorial de velocidade**. 2020. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2020. Acesso em: 16 jun. 2025.

VARGAS, Soraida Aguilar. **Previsão da distribuição da densidade de probabilidade da Geração de Energia Eólica usando técnicas não paramétricas**. 2015. 191 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Puc-Rio, Rio de Janeiro, 2015.

VESTAS WIND SYSTEMS A/S. *V150-4.2 MW™*. Disponível em: <https://www.vestas.com/en/products/offshore-platforms/v150-4-2-mw>. Acesso em: 5 jul. 2025a.

VESTAS. Introducing the V236-15.0 MW™. Disponível em: <https://www.vestas.de/content/dam/vestas-com/de/v236150MWBrochureOffshore.pdf.coredownload.inline.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2025b.

VESTAS. V236-15.0 MW™. Disponível em: <https://www.vestas.com/en/energy-solutions/offshore-wind-turbines/V236-15MW>. Acesso em: 6 maio 2025a.