

A ENERGIA EÓLICA MARÍTIMA (OFFSHORE): O CONTEXTO NACIONAL E AS PERSPECTIVAS FUTURAS

OFFSHORE WIND ENERGY: THE NATIONAL CONTEXT AND FUTURE PERSPECTIVES.

CORREIA, Leandro Teixeira¹
AZEVEDO JR, Geraldo Motta²

Resumo: O presente artigo visa à análise de uma viabilidade da implantação do sistema de energia eólica *offshore* em território brasileiro. Traz um breve histórico do desenvolvimento da eólica *offshore* no exterior até os primeiros projetos no Brasil. Apresenta os conceitos e componentes de um aerogerador e das fundações das torres. Descreve a ciência de conversão da energia, desde a incidência dos ventos até a concepção da energia elétrica e uma análise da curva de potência de uma turbina eólica. Tem como principais ferramentas de análise da viabilidade, a escolha do local e dos aerogeradores adequados ao sistema de geração, uma breve análise do custo de implantação e um cálculo comprobatório da viabilidade. Conclui-se que o Brasil seja um local de ótima expectativa de geração devido o vasto território litoral e marítimo para exploração, porém, a maior desvantagem está no alto custo dos investimentos de um projeto. As empresas buscam liberação para iniciar as atividades no Brasil com a esperança de que ao logo dos próximos anos, no decorrer das atividades, consigam através de medidas de otimização de seus processos, reduzir os custos dos projetos. O projeto é viável, porém com retorno econômico a médio ou longo prazo.

Palavras-chave: Eólica *Offshore*; Viabilidade; Aerogeradores; Turbina Eólica; Geração de Energia.

Abstract: The present work aims to analyze the feasibility of implementing an offshore wind energy system in Brazilian territory. Brings a brief history of the development of offshore wind abroad until the first projects in Brazil. It presents the concepts and components of a wind turbine and the foundations of the towers. It describes the science of energy conversion, from wind incidence to electrical energy design and an analysis of the power curve of a wind turbine. Its main feasibility analysis tools are the choice of location and suitable wind turbines for the generation system, a brief analysis of the cost of implementation and the calculation to prove feasibility. It is concluded that Brazil is a place of great generation expectation due to the vast coastal and maritime territory for exploration, however, the biggest disadvantage is the high cost of investments in a project. Companies are looking for permission to start activities in Brazil with the hope that over the next few years, in the course of activities, they will be able to reduce project costs through measures to optimize their processes. The project is viable, but with economic return in the medium or long term.

Keywords: Offshore Wind; Viability; Wind turbines; Wind turbine; Power generation..

¹ Graduando em Engenharia Elétrica – Universidade Santa Úrsula – leandro.correia@souusu.com.br

² Doutor em Engenharia Elétrica – Universidade Santa Úrsula – geraldo.motta@usu.edu.br

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do tema

Ao longo dos anos, as revoluções tecnológicas exponencialmente crescentes e a obtenção de produtos eletroeletrônicos de forma massiva, vem resultando no consumo de energia cada vez maior. A busca por novas formas de energias tem sido cada vez mais crescente pelo mundo e por sua vez as buscas por energias renováveis e limpas tem sido alvo de grandes debates.

Antes, os principais países consumidores de energia no mundo, baseavam todas as suas expectativas de energia em combustíveis fósseis, porém, com as crises econômicas ocasionadas pelas altas dos preços dos mesmos e o fato de também possuírem uma quantidade finita para serem explorados, a necessidade de se buscar novos meios de fontes de energia se tornou cada vez mais evidente.

A nação brasileira é um dos países de maior referência na utilização de fontes renováveis em sua matriz elétrica (CNNBRASIL, 2022). Registros evidenciados no ano de 2020 pelo Ministério de Minas e Energia, apontam que mais de 80% da matriz é renovável, porém com domínio no seguimento da exploração da fonte hidráulica.

A fonte hidráulica, com as usinas hidrelétricas, domina a matriz elétrica há muitos anos, mas as fontes solar e eólica vem ganhando seus espaços devido aos seus custos reduzidos, refletindo o alto potencial do Brasil.

Na Europa, o interesse pela implantação de energia eólica teve início em torno de 1890 com a criação do primeiro plano governamental com incentivo ao desenvolvimento eólico (PERFIL ENERGIA, 2022).

Na Rússia, em 1931, surgiu os primeiros aerogeradores de grande porte, sendo utilizados para aplicações elétricas.

O presente artigo, pretende evidenciar, a evolução do sistema de energia eólica em vários territórios incluindo o Brasil, destacar a eficiência da energia eólica *offshore*, abordando a necessidade da adoção desta fonte de energia.

1.1. Objetivo geral

Este artigo tem como objetivo geral, provar a viabilidade da implantação da energia eólica *offshore* no litoral brasileiro, através de um estudo que explore e detalhe o potencial de geração no território nacional.

1.2. Objetivos específicos

Este artigo busca demonstrar através de estudos e pesquisas, a importância da escolha dos aerogeradores, a definição do local mediante ao fluxo dos ventos e uma análise por meio de cálculos comprobatórios baseados na geração e no custo do projeto.

1.3. Justificativa

A exploração da energia eólica *offshore* abordada neste artigo, traz uma grande expectativa quanto ao surgimento de mais uma alternativa de fonte de energia que contribua no combate ao consumo excessivo de energia elétrica que tem crescido ao longo dos anos no Brasil e no mundo.

A energia eólica *offshore*, baseia-se na atividade de exploração e geração de energia através de imensas estruturas posicionadas em áreas oceânicas e nas costas marítimas. Tem o vento como uma potente e infinita ferramenta para alimentação do sistema de exploração, já que eles podem circular livremente e de forma intensa pela região explorada.

Como será estudado neste artigo, a potencialidade da obtenção de energia pelo sistema de exploração *offshore*, comparado com o sistema *onshore*, tradicionalmente conhecido, pode chegar a mais que o dobro da produção de energia elétrica.

O aumento da produção de energia elétrica por meio de energia eólica *offshore*, é de fundamental importância para desafogar os meios de exploração existentes, em especial a energia gerada pelas hidrelétricas. Servem como alternativas também para gerações de empregos, já que depende de mão de obra especializada para as atividades de trabalho. E também, como alternativa para a preservação do meio ambiente, já que é um sistema limpo e pouquíssimo danoso ao meio ambiente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O surgimento da energia eólica *offshore* no mundo

Conforme a figura 1, o primeiro Parque *Offshore* instalado no mundo, foi o Vindeby, em 1991 na Dinamarca. Esta empreitada teve por objetivo, provar a viabilidade de energia limpa *offshore* (OFFSHORE WIND, 2017). Este se manteve ativo por vinte e cinco anos, permitindo assim, a comprovação da viabilidade da implementação de projetos similares e introduzindo várias soluções para o funcionamento de turbinas eólicas *offshore*. No ano de 2000, foi

desenvolvido o Parque Eólico de Middelgrunden, também na Dinamarca, e neste período ele era classificado como o maior do mundo, apresentando vinte turbinas e com capacidade de 40 Megawatts (LARSEN, 2001). Ainda em 2000, o Parque Eólico *Offshore* Blyth, o primeiro parque eólico do Reino Unido, apresentava duas turbinas e capacidade de 4 Megawatts. Este foi o primeiro parque a utilizar a tecnologia Float and submerge, o que possibilitava que as turbinas fossem rebocadas e desta forma reduzia os custos com instalações de fundações no fundo do mar, mas em 2019 foi descomissionado (EDF, 2019).

Figura 1 - WindEurope - Construído em 1991, Vindeby na Dinamarca – Aerogerador



Fonte: WINDEUROPE ASBL/VZW

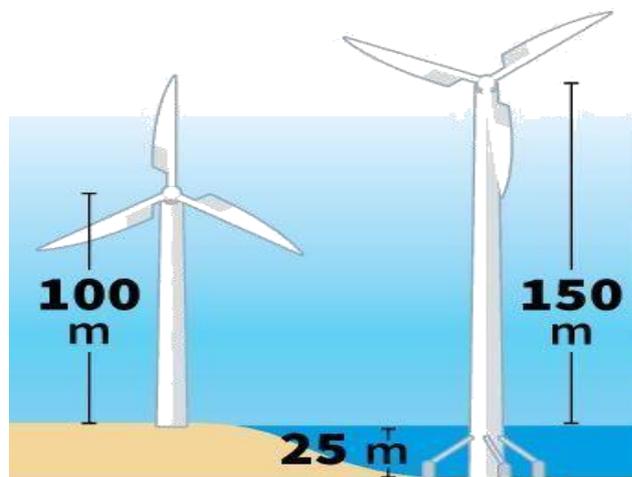
A Europa foi a pioneira no desenvolvimento e implantação da tecnologia que possibilitava a instalação de parques eólicos de maneiras seguras e favoráveis, e colhem frutos desta iniciativa, tanto na produção de energia quanto nos negócios como um todo, até os dias atuais. Sendo assim, a maioria dos projetos, são gerenciados por empresas europeias e a produção dos componentes necessários para a construção das turbinas também tem origem europeia, sendo ou não em território europeu.

2.2 A energia eólica *offshore*

A energia eólica pode se subdividir em dois tipos diferentes e tais divisões tem por base o local onde estão inseridas. Podem ser: *Onshore* e *Offshore*. A Energia Eólica *Onshore* são os parques de geração onde as turbinas estão instaladas em terra e utilizam os ventos vindos sobre

o continente para gerar a eletricidade, já a Energia Eólica *Offshore*, tem a sua instalação em ambientes marítimos, como mostra a figura 2, e a sua fonte mantenedora de energia, são os ventos de alta velocidade e disponibilidade regular encontradas sobre o mar. As unidades de produção destes, ficam localizadas em vários pontos da costa, com profundidades específicas e variadas.

Figura 2 - Energia eólica *onshore* e *offshore*



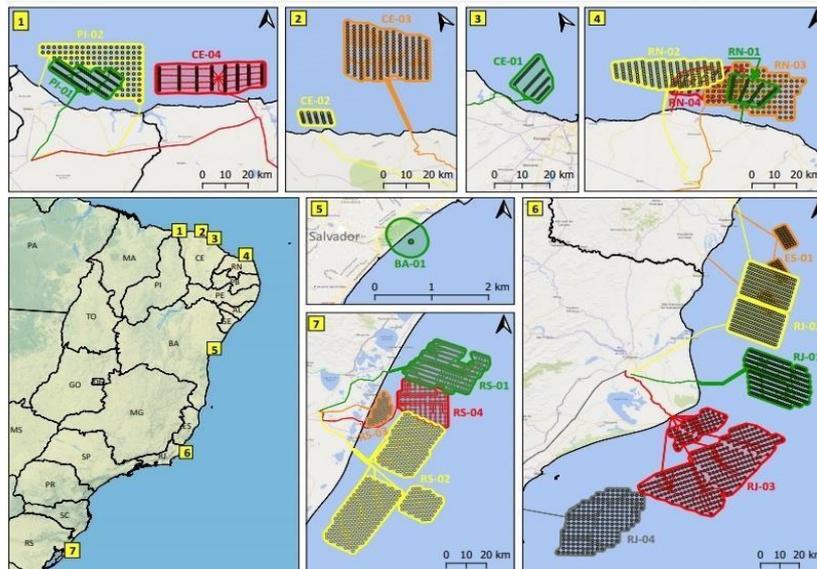
Fonte: Gazeta do Povo

A energia Eólica, utiliza a força dos ventos para a produção de eletricidade e atualmente ocupa a terceira posição entre as principais fontes de energia no país, superadas apenas pelas hidroelétricas e biomassa.

A escolha da região a ser instalada cada turbina, não é aleatória, são considerados fatores de grande importância, tais como: o potencial eólico *offshore* de cada local que será instalado.

Há indicativos de elevado potencial para exploração *offshore* da energia eólica nos litorais do Nordeste, do Rio de Janeiro e do Sul do Brasil, como pode ser visto na figura 3. Atualmente o país se destaca na produção desta energia, com 13,4 GW de capacidade instalada. Essa quantidade, tem a capacidade de abastecer cerca de 22 milhões de residências por mês. Na atualidade, no Brasil, há 534 parques eólicos em doze estados, possuindo mais de 6.600 aerogeradores com energia limpa. No Brasil os ventos possuem a capacidade médio de 41,8% comparado a 25 % da média mundial (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA - ABEEÓLICA).

Figura 3 - Projetos de exploração de energia eólica *offshore* pelo Brasil



Fonte: Ibama

O nosso país possui vantagens, pois os litorais do Rio Grande do Norte e do Ceará possuem uma vasta área com profundidades inferiores a 50 m, que permite por sua vez, utilizar subestruturas mais simples para a geração eólica *offshore*.

2.3 Como é composto o sistema de exploração da energia eólico *offshore*

De acordo com uma gama de estudos e avaliações, os custos atrelados à construção de um parque eólico *offshore*, conforme mostrado na figura 4, comparados com uma instalação *onshore* é complexo e alto.

Figura 4 - Construção de um parque eólico *offshore*



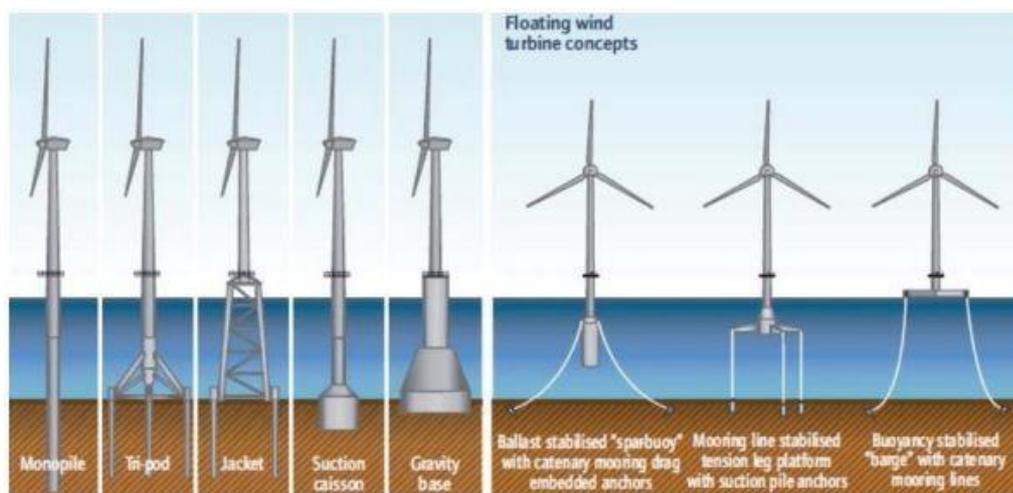
Fonte: Rampion Offshore Wind

É necessário realizar ajustes à robustez das torres para suportar velocidades mais altas de ventos e os materiais utilizados devem ser mais protegidos contra ferrugens e corrosões, e também, realizar estudos de opções de fundações e sistemas de ancoragem e toda infraestrutura de transmissão de energia. Sendo assim, todos esses fatores precisarão estar alinhados com as condições do mercado para gerar a rentabilidade e somente assim, poder ser iniciada a construção da mesma.

2.3.1 Aerogeradores

São constituídos por 5 partes: a fundação, a torre, o rotor, a nacelle e o conversor, conforme figura 6. A fundação, conforme ilustrada na figura 5, é a responsável em dar sustentação ao aerogerador. Para os modelos *Offshore*, esta é encarregada de sustentar os esforços estáticos e dinâmicos da torre. Segundo RIBEIRO 2015, a fundação pode ser classificada em:

Figura 5 - Tipos de fundações de estruturas eólicas *offshore*



Fonte: iepuc.puc-rio

2.3.1.1 A fundação divide-se em:

- Fixos: onde o aerogerador realiza a transferência de força para o fundo do mar;
- Flutuantes: permite que o aerogerador tenha mobilidade, fixado apenas com âncoras.

2.3.1.2 O sistema estrutural fixo divide-se em:

- Gravidade: baseia-se na dimensão e peso para realizar a fixação e estabilidade;
- Estacas: usa a cravação de estacas que sejam resistentes aos esforços transferidos para o fundo do mar;
- Sucção: utiliza a subpressão no interior da fundação.

2.3.1.3 Os principais tipos de estrutura suporte:

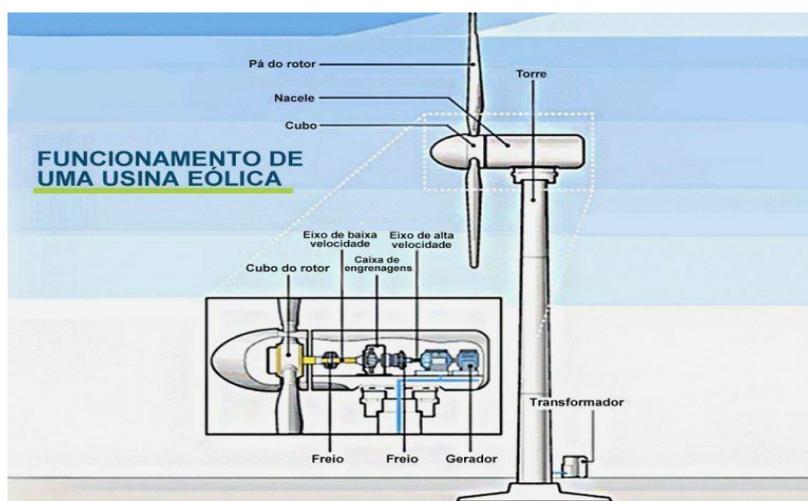
- Gravidade; Estaca (única); Tripé; Treliça; Sucção e Flutuantes.

A profundidade das águas de instalação da unidade produtora é fator de suma importância para determinar o tipo de material que será utilizado. Sendo assim, quanto mais funda a região de instalação, mais inviável se torna as estruturas fixas, desta forma a escolha principal são as estruturas com turbinas flutuantes. (UNIVERSITY OF STRATHCLYDE, 2017).

Geralmente, as fundações fixas são instaladas em águas de até sessenta metros de profundidade. Existe um tipo adequado de fundação fixa para assegurar uma boa ancoragem e garantir estabilidade e prover condições favoráveis para o funcionamento dos aerogeradores. Os aerogeradores flutuantes, devido aos sistemas de ancoragem, têm o potencial de ampliar a área de atuação das turbinas eólicas de forma substancial.

Aproximadamente dezoito por cento do custo gerado por plataformas flutuantes de suporte a aerogeradores vem dos guinchos necessários para controle de tensão dos cabos. (FULTONet. al., 2005).

Figura 6 - Composição de uma turbina eólica *offshore*



Fonte: Quanta geração

2.3.2 Torres

As torres tem por função, suportar o rotor e a nacela. Confere aos aerogeradores estatura necessária e posicionam de forma elevada o rotor e a nacela para produzir energia. Em seu corpo fica o elevador usados pelos profissionais com eficiência e segurança. (BARRETO,2019).

2.3.3 *Nacele*

Nas naceles concentram-se as turbinas. Elas possuem um eixo principal, amortecedores, a caixa de multiplicação e o anemômetro. É o local onde é realizado a maior parte da geração de energia em um aerogerador. (BARRETO - 2019, apud Modesto e Freitas, 2020, adaptado).

2.3.4 Rotor

São as pás da hélice e o suporte das pás. O design das pás influenciam na geração de grandes ganhos de eficiência produtiva. (BUHL et. al., 2007). Os modelos com três pás são os mais utilizados.

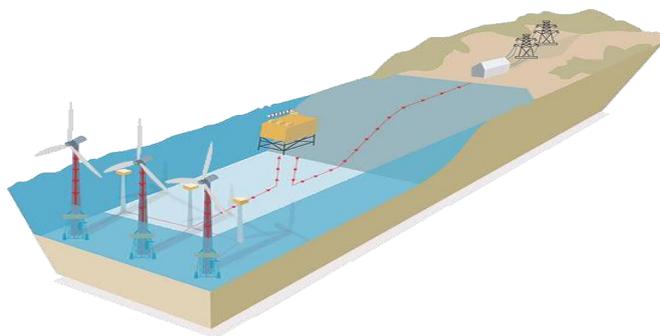
2.3.5 Conversores

São responsáveis em condicionar a energia, realizando os ajustes do gerador e a voltagem para a transmissão da malha e possuem estruturas grandes e pesadas (ISLAM et. al., 2013).

2.4 A transmissão de energia

Os sistemas de Transmissão de energia, conforme figura 7, podem ser: O Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Alternada - HVAC, Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Contínua usando conversores com Comutação Natural de Linha - HVDC LCC e o Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Contínua usando Conversores com Comutação Forçada (Conversores Fonte de Tensão) - HVDC VSC (TAVARES, 2010). Dentre os três, o mais instalados é o HVAC, pois é o mais antigo e com o passar dos anos evoluiu e conseqüentemente obteve redução nos custos e houve otimização quando a perda de energia. Os cabos de energia precisam ser robustos à medida que o parque é instalado longe da costa (BURDOCK, 2020).

Figura 7 - Sistema de transmissão de energia da turbina, cabos de transmissão, subestação *offshore*, subestação *onshore* até o sistema de transmissão.



Fonte: Iberdrola

De acordo com BURDOCK 2020, as subestações são de grande importância para o projeto de parques de alta produção de megawatts. Pois tem a função de estabilizar e maximizar a voltagem da energia gerada e realizam uma comunicação energética em terra.

2.5 As vantagens e desvantagens da energia eólica offshore

Vantagens:

- ❖ É uma energia renovável, inesgotável e não poluente;
- ❖ A quantidade de recurso no mar é maior do que na terra;
- ❖ Não possui impacto visual e acústico significativo por ser em alto mar;
- ❖ Facilidade de transporte marinho: Os aerogeradores *offshore* alcançam potências mais altas devido aos portes, maiores do que os da terra (*onshore*).

Desvantagens:

- ❖ Os *Onshore* ainda apresentam valores menores que os *Offshore*;
- ❖ Pode provocar impacto sobre a indústria pesqueira, principalmente durante a construção desta;
- ❖ Há criação de recifes artificiais atraindo os peixes para esta área, podendo gerar impacto no aumento de peixes neste local. A pesca será proibida neste espaço devido ao risco de navegação entre as grandes estruturas.

2.6 Como se encontra o Brasil e o mundo

Segundo dados do Governo Federal, o Brasil apresentou no ano de 2021, uma expansão da capacidade de instalações de energia eólica *onshore*. As usinas já possuem uma resposta de 11% da matriz energética e tem 20 gigawatts de potência instalada.

De acordo com a GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, o Brasil tem apresentado grande crescimento, saltando de 1 gigawatts de potência instalada em 2011 para quase 21 gigawatt em janeiro de 2022. A China continua liderando com 310,6 gigawatts de potência instalada. No Brasil, ainda segundo a Global WIND ENERGY COUNCIL, a energia eólica é uma das maiores fontes de geração de energia renovável, tendo como principal a hidráulica. Segundo a análise desta revista supracitada, o Brasil se encontra entre os países maiores produtores de energia eólica do mundo. Juntamente se destacam a China, os Estados Unidos, o Vietnã e o Reino Unido.

O Brasil em 2021, alcançou a expansão da capacidade instalada de energia elétrica com fonte eólica em 3.051,29 megawatts, com base em dados de novembro deste mesmo ano. Foi o

maior desenvolvimento da fonte desde 2014, quando o crescimento foi de 2.786 MW (ANEEL).

De acordo com a ANEEL, os dados mostram que atualmente há cerca de 5,5 gigawatts de usinas eólicas em desenvolvimento no país e ainda em 2022 cerca de 2,95 gigawatts estarão disponíveis.

2.7 Quais as expectativas da energia eólica *offshore* para o futuro

Com cerca de 8.000 quilômetros de costa, o Brasil tem um potencial considerado imenso para uma das tecnologias mais modernas de geração de energia renovável: a eólica *offshore*, que usa turbinas fixas ou flutuantes instaladas no mar, enquanto na *onshore* as estruturas e os equipamentos ficam em terra.

Mediante ao vasto território para exploração, e por possuir nestas regiões, ventos acima de 7 m/s, velocidade já considerada atrativa para a eficiência do sistema eólico *offshore*, segundo a Roadmap 2020, com estruturas a 100 m de altura inseridas em locais com profundidade de até 50 m, o potencial do Brasil chegaria a 697 GW.

O país está entre os destaques de um recente estudo sobre o tema, produzido pelo Programa de Assistência Gerencial ao Setor de Energia (ESMAP, na sigla em inglês) e pela Corporação Financeira Internacional (IFC), braço do Grupo Banco Mundial para o desenvolvimento do setor privado.

Segundo o Decreto 10.946, os mecanismos de cessão de uso em áreas de águas interiores de domínio da União, no mar territorial, dispõem sobre o aproveitamento dos recursos naturais na zona econômica exclusiva e na plataforma continental para geração de energia elétrica *offshore*. E isto vem trazendo incentivo a produção de energia eólica.

A intenção, de acordo com o Ministério de Minas e Energia, é dar segurança jurídica aos investidores nacionais e internacionais interessados em desenvolver projetos de geração, inclusive em parques eólicos *offshore*.

3 METODOLOGIA

Este artigo tem como metodologia de pesquisa, abordar a viabilidade de uma nova fonte de energia elétrica, em território brasileiro: a energia eólica *offshore*. Conceituando de forma clara e objetiva a ciência que envolve o rendimento do sistema abordado; demonstrar através de uma análise territorial, os locais onde se encontram os melhores níveis de ventos na região nacional; apresentar os critérios de escolha para definição dos equipamentos adequados; e evidenciar cálculos comprobatórios com base nos dados pesquisados, abordando uma breve análise sobre a principal desvantagem da implantação no Brasil: o alto custo do investimento.

3.1. O conceito de rendimento do sistema

O rendimento do sistema que envolve a geração de energia eólica, parte do conceito da energia cinética que ocorre com o impacto dos ventos (massa de ar) nas turbinas aerogeradoras causando o movimento de rotação das pás do rotor. Tal fenômeno pode ser explicado cientificamente conforme equação (I):

$$E_C = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (I)$$

Onde:

E_C - Energia

cinética -

Massa de ar;

V - Velocidade do vento (m/s).

A potência real extraída, $P_{EXT\ real}$ (BURTON et al., 2001; MATTAR; GUZMÁN-IBARRA, 2017) de uma turbina eólica, pode ser expressa pela equação (II):

$$P_{EXT\ real} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta \quad (II)$$

Onde:

$P_{EXT\ real}$ - Potência real a ser extraída por uma

turbina; ρ - Densidade do ar (Kg/m^3);

A - Área da seção transversal da turbina

(m^2); V - Velocidade do vento (m/s);

C_p - Coeficiente de potência de uma turbina (Limite de Betz) - 59,3%;

η - Rendimento da turbina eólica considerando as perdas mecânicas e elétricas.

3.2. Curva de potência

Uma outra maneira de se avaliar o rendimento do sistema referente ao potencial eólico de uma região é por meio da análise do gráfico chamado de *curva de potência*, mostrada na figura 8. Conforme a publicação no site windbox, a curva de potência de um aerogerador, corresponde a um gráfico que expressa a relação da potência elétrica gerada pelo equipamento mediante a velocidade do vento aplicada sobre ele. Geralmente é inserido um anemômetro na nacele do aerogerador para medir a velocidade do vento quando este passa pelo rotor.

Figura 8 – Simulação da Curva de Potência de um aerogerador



Fonte: windbox

Com este exemplo, é possível perceber que:

- O equipamento inicia a geração de energia a partir de 3 m/s;
- Atinge sua potência máxima de 3.300kW ou 3,3MW com velocidade média de 11 m/s;
- Mantem sua potência máxima entre as velocidades de 11 m/s a 19 m/s;
- Após 19 m/s, sua velocidade e o potencial de geração diminui gradativamente como medida de segurança para evitar danos ao próprio equipamento.

É importante destacar que cada fabricante elabora o diagrama para os seus aerogeradores e repassa aos seus clientes, deixando a cargo deles, a decisão da escolha que correspondam as suas necessidades e também para servir de ferramenta de consulta a ser usada durante as atividades de operação e manutenção dos equipamentos. Mediante a velocidade média dos ventos de uma determinada região, será necessário instalar no local, o aerogerador

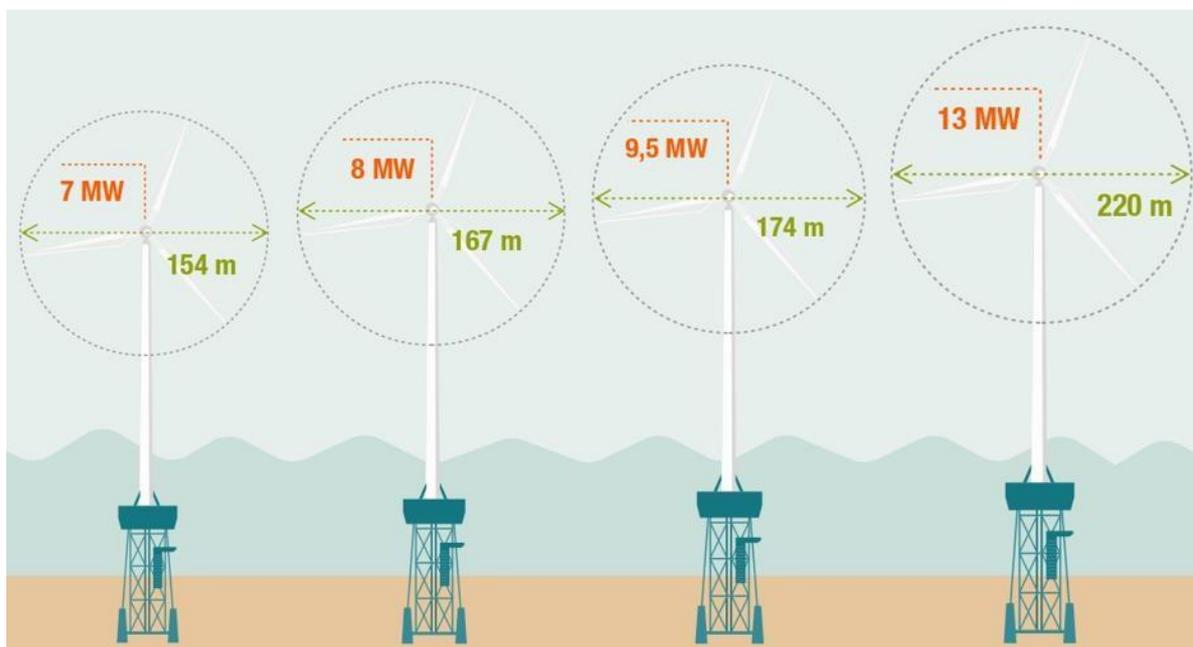
com a capacidade de geração nominal adequada.

3.3. A escolha dos aerogeradores

O rotor de um aerogerador é composto em sua maioria, por três pás e um eixo. Este último, é ligado a um gerador elétrico. Quando os ventos entram em contato com as pás da turbina, a partir de uma certa velocidade, fazem com que essas pás entrem em um movimento rotacional, gerando uma energia mecânica através da rotação do eixo vinculado ao gerador elétrico, gerando a energia elétrica. É o que consta na publicação da USP no site da *secretaria de desenvolvimento econômico*. Quanto maior for o comprimento do diâmetro do rotor e de suas pás, mais energia elétrica essa turbina ou aerogerador será capaz de gerar.

Deve-se escolher adequadamente o aerogerador para o local que se deseja instalar. O tamanho do diâmetro corresponde a potência nominal, como mostrado na figura 9.

Figura 9 - Tamanhos de aerogeradores: potência nominal x diâmetro do rotor



Fonte: IBERDROLA

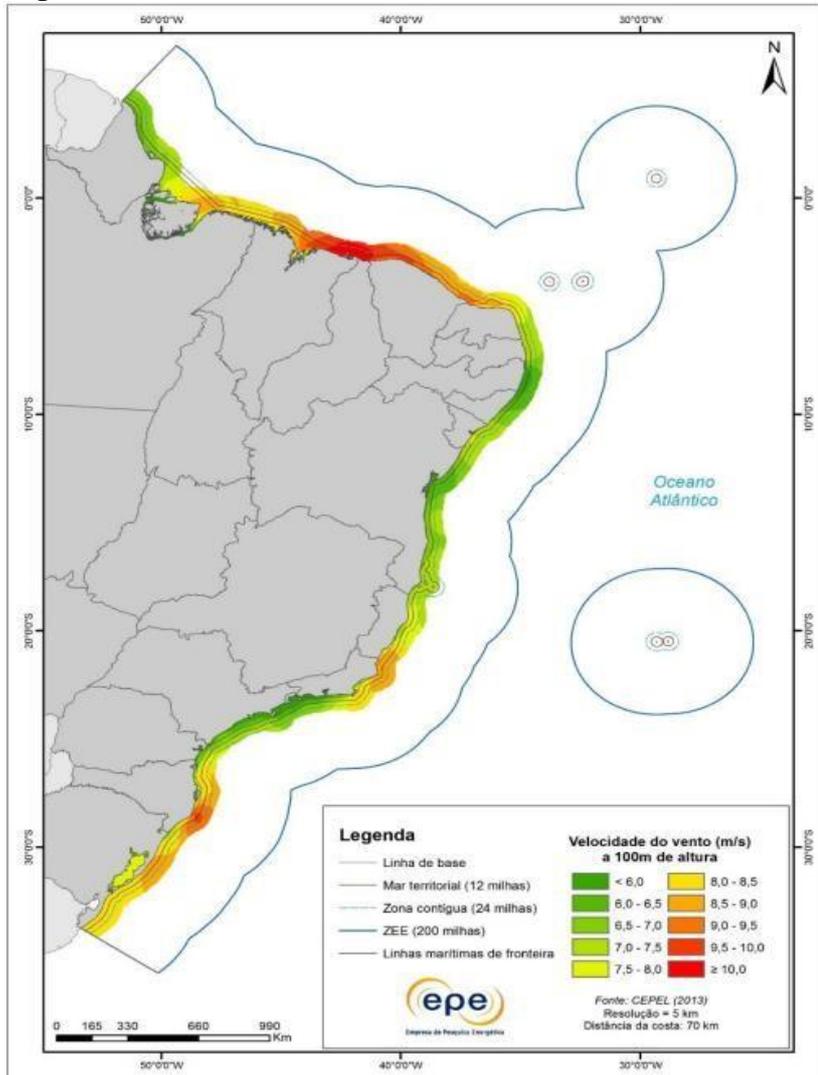
Conforme as informações anteriores, e a Roadmap Eólico *Offshore* Brasil (2020), é possível observar que as turbinas tendem a ficar cada vez maiores, devido a busca dos fabricantes em construir equipamentos mais potentes, aumentando a área de contato do rotor com a massa de ar. Devido ao contato direto com a água do mar, os equipamentos devem ser projetados com os cuidados de proteção contra a corrosão, a ação das ondas e marés. Isto

influencia no custo de construção e manutenção do equipamento.

3.4. A definição do local com influência dos ventos

O Roadmap Eólico *Offshore* Brasil (2020), elaborado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) informa que nas regiões com médias de velocidades de ventos acima de 7 m/s, já podem ser consideradas atrativas para a implantação da energia eólica *offshore*. Através dos mapas das figuras 10 e 11, é possível visualizar as distribuições das velocidades dos ventos de acordo com cada região.

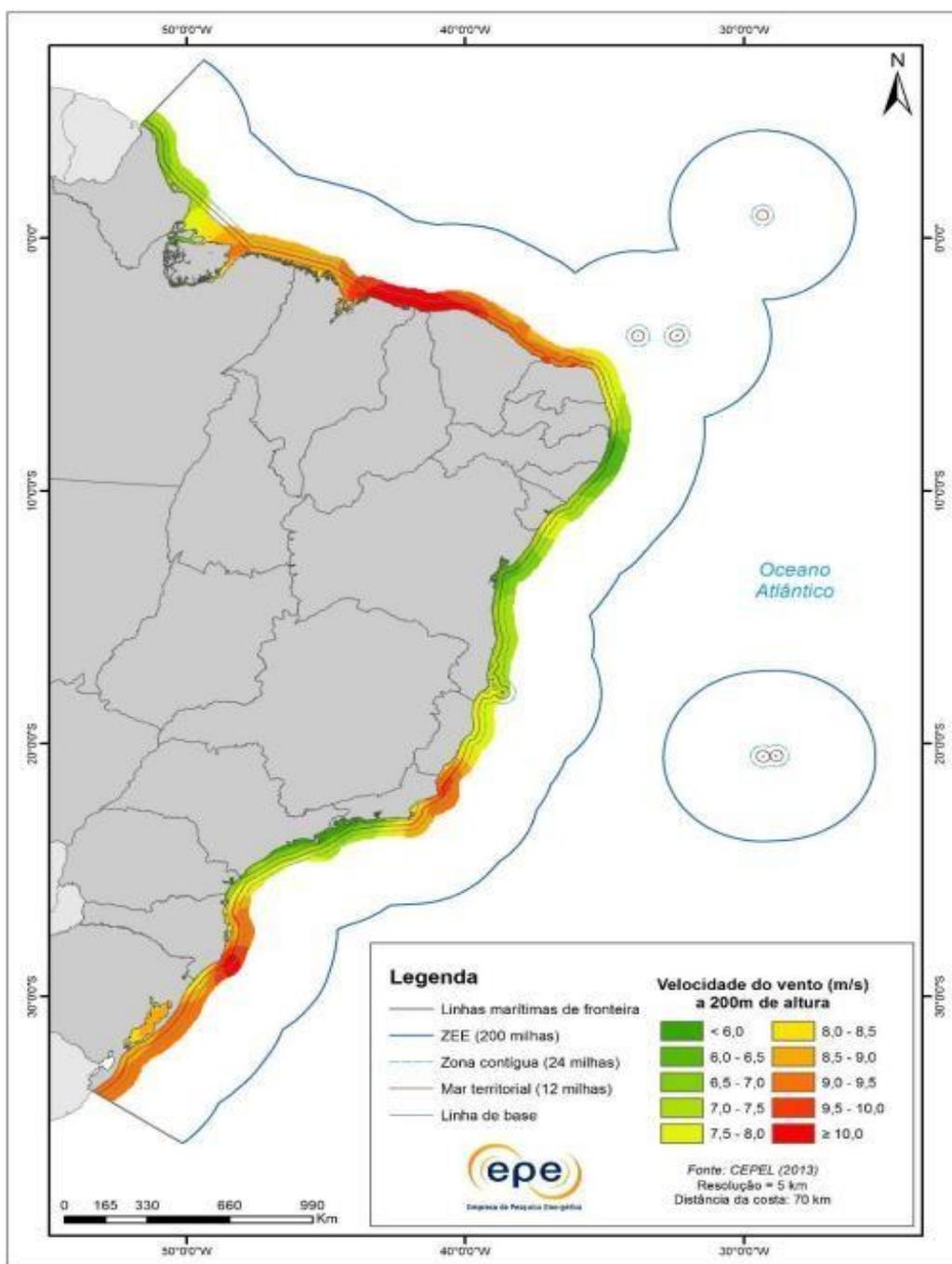
Figura 10 - Velocidade média dos ventos no Brasil a 100 m de altura



Fonte: Roadmap Eólico *Offshore* Brasil

É possível notar, em uma comparação entre os mapas, uma diferenciação com relação aos níveis das velocidades dos ventos, indicadas conforme as cores que envolvem as regiões costeiras do Brasil (nordeste, sudeste e sul), identificadas pelas legendas. Duas características que influenciam o aumento da velocidade dos ventos são: a distância da costa e a altura dos dados coletados em relação ao nível do mar.

Figura 11 - Velocidade média dos ventos no Brasil a 200 m de altura



Fonte: Roadmap Eólico *Offshore* Brasil

3.5. A análise de custo da implantação de um projeto eólico *offshore* no Brasil

No Roadmap Eólico *Offshore* Brasil (2020), estudos mostram que o custo de geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis está cada vez mais competitivo, tanto em âmbito nacional quanto internacional. Nas atividades especificamente à energia eólica *offshore*, existem boas expectativas devido as recentes baixas nos valores em países onde os projetos já estão sendo implementados.

Ao comparar os custos de investimento de projetos de usinas eólicas *offshore* com as eólicas *onshore*, chega-se à conclusão de que a implantação das usinas eólicas *offshore* custam em média, duas vezes mais do que as eólicas *onshore*.

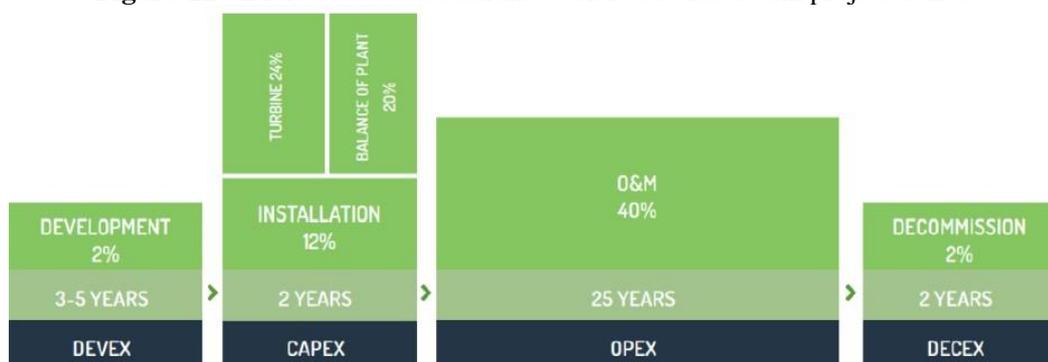
Para José Partido Solano, gerente de Desenvolvimentos de Negócios da Ocean Winds, empresa que possui operações na Europa, Estados Unidos e Ásia, as usinas eólicas marítimas tem um Capex (despesa com investimento) elevado (DIÁRIO DO COMÉRCIO, 2022). Pela estimativa da OW, no Brasil, as eólicas *offshore* demandariam cerca de *13 a 16 bilhões de reais* em investimentos para cada gigawatt, que seria um pouco mais que o dobro dos investimentos da eólica *onshore*.

Segundo a Roadmap (2020), a divisão dos custos orçamentários de um empreendimento eólico *offshore*, ocorre da seguinte forma:

- Fabricação das turbinas eólicas: composição das pás, rotor, torres, nacelle e demais dispositivos;
- Obras civis: custos de construção e fundação;
- Conexão: custos com cabeamentos, subestações e outras estruturas, serviços de conexão à rede de distribuição ou transmissão;
- Custos de capital: custos de desenvolvimento e engenharia de projeto, consultorias, licenças, etc.

Pode-se observar, como demonstra a figura 12, a divisão de cada etapa de um projeto eólico *offshore*, desde a fase de desenvolvimento até o descomissionamento.

Figura 12 - Divisão de custos durante o ciclo de vida de um projeto eólico.



Fonte: ORE Catapult / Offshore Wind Industry Council

Conforme a Roadmap (2020), algumas medidas de otimização dos processos durante a instalação, operação e manutenção, contribuem para reduções de custo dos projetos (redução do CAPEX). Segue os exemplos de medidas que podem ser tomadas:

- Elaboração de medidas que possam atuar na fabricação das turbinas, diminuindo os custos de fabricação: utilização de novos materiais, modelos diferentes, etc;
- Uso de várias subestações menores instaladas nas fundações das turbinas;
- Utilização de grandes embarcações com maiores plataformas, otimizando o tempo e quantidade de equipamentos transportados;
- Melhorias na transferência das equipes de manutenção ou manutenção remota e automatizada;
- Entre outros.

4 ANÁLISE - CÁLCULO COMPROBATÓRIO DA VIABILIDADE DO PROJETO

Os projetos de implantação da geração de energia eólica *offshore* no Brasil, atualmente, encontram-se em processo de licenciamento no Ibama, chegando a quase 170 GW de capacidade instalada (ENERGIAHOJE, 2022). A TotalEnergies, uma das maiores produtoras de petróleo e gás, tem em processos de licenciamento no Brasil, um projeto de 9 GW de potência instalada, dividida em 3 estados conforme a seguir (epbr, 2022):

- Projeto Sopros do Ceará: 200 aerogeradores de 15 MW totalizando 3 GW de potência instalada;
- Projeto Sopros do Rio de Janeiro: 200 aerogeradores de 15 MW totalizando 3 GW de potência instalada;

- Projeto Sopros do Rio Grande do Sul: 200 aerogeradores de 15 MW totalizando 3 GW de potência instalada.

Com o intuito de demonstrar a viabilidade deste projeto através de uma simulação, foi feita uma pesquisa de um aerogerador com a potência nominal de 15 MW. Como resultado desta pesquisa, encontrou-se o modelo V236-15.0 MWTM, da fabricante dinamarquesa VESTAS, mostrada na figura 13. Esta companhia é considerada um das maiores produtoras de turbinas eólica do mundo. Conforme dados tirados do site do fabricante, o modelo apresenta um rotor com 236 metros de diâmetro.

Figura 13 - turbina eólica usada como exemplo no projeto de análise



Fonte: Vestas

Mediante aos dados pesquisados para cada um dos três projetos de parques eólicos, estão:

- Aerogerador (V236-15.0 MWTM): 15 MW de potência nominal com 236 m de diâmetro do rotor;
- Densidade do ar: 1,225 kg/m³;
- Cp (Coeficiente de potência de uma turbina – Limite de Betz): 59,3% = 0,593;
- η (Coeficiente de eficiência do sistema considerando perdas mecânicas e elétricas). Consideraremos o sistema 100% eficiente, devido a falta de informação de perda mecânica e elétrica durante a operação da turbina, por parte do fabricante.

Será realizado o cálculo com o intuito de encontrar a velocidade média dos ventos que venham favorecer ao sistema. Para isso, será realizado o cálculo da área da seção transversal da turbina, mostrada na equação (III), também conhecida como área de varredura que sofrerá a força dos ventos, iniciando o sistema de rotação.

$$\text{Área} = \pi \cdot r^2 \quad (\text{III})$$

$$A = \pi \cdot \left(\frac{236}{2}\right)^2 = \pi \cdot (118)^2 = \pi \cdot 13924 = 43743,54 \text{ m}^2$$

Relembrando a fórmula do conceito de conversão de energia eólica (II), temos:

$$P_{EXT \text{ real}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta \quad (\text{II})$$

Inserindo todos os dados na fórmula (II):

$$15 \cdot 10^6 = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 43743,54 \cdot V^3 \cdot 0,593 \cdot \frac{100}{100}$$

Assim:

$$V^3 = \frac{15 \cdot 10^6}{15888,2} = \sqrt[3]{944} = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Com o valor da velocidade dos ventos de 9,81 m/s, torna-se viável que nos pontos de instalação dos parques eólicos escolhidos pela empresa TotalEnergies, para implementação de seus projetos, devam ser instalados os aerogeradores partir de 200 metros de altura e distância de 70 Km da costa, como consta no mapa da figura 11.

Para uma estimativa de preço de um projeto, conforme citado anteriormente, no Brasil, cada GW instalado custa em média de 13 a 16 bilhões de reais. Com esses dados, podemos simular também, um valor estimativo para o projeto em questão. O cálculo será realizado com base no valor médio da informação apresentada, conforme a seguir:

$$\frac{R\$ 13.000.000.000,00 + R\$ 16.000.000.000,00}{2} = R\$ 14.500.000.000,00$$

Potência total instalada do projeto x valor médio:

$$9 \text{ GW} \times R\$ 14.500.000.000,00 = R\$ 130.500.000.000,00$$

Utilizando o conceito de divisão de custos de um projeto eólico *offshore*, publicado na Rodomap Eólico *Offshore* Brasil (2020), temos as seguintes etapas:

- Desenvolvimento (2%): R\$ 2.610.000.000,00

- Instalação (12%): R\$ 15.660.000.000,00
- Turbina (24%): R\$ 31.320.000.000,00
- Componentes de Suporte (20%): R\$ 26.100.000.000,00
- Operação & Manutenção (40%): R\$ 52.200.000.000,00
- Descomissionamento (2%): R\$ 2.610.000.000,00

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil possui uma extensa região costeira e marítima que possibilita a geração de energia eólica *offshore* por parte dos fortes e constantes ventos em seu território, viabilizando os projetos. Muitas empresas deram entrada nos processos de licenciamento geridos pelo Ibama, solicitando a liberação para iniciar as atividades em território brasileiro. Hoje, conforme o somatório das solicitações, os projetos chegam a quase 170 GW de capacidade instalada. Porém, o custo dos empreendimentos e da geração ainda são altos. Como em alguns países ocorreram quedas nos custos dos projetos ao longo de sua execução, espera-se que o mesmo ocorra no Brasil, no decorrer das atividades.

Espera-se que as empresas possam estabelecer medidas de redução de custos e otimização em seus processos de produção (instalação, operação e manutenção) no intuito de reduzir o CAPEX, valor do investimento dos projetos.

Mediante aos dados abordados, as análises e aos cálculos comprovando a viabilidade dos projetos eólicos *offshore* no Brasil, entende-se que mesmo sendo uma atividade de geração de alto custo, a produção de energia elétrica gerada pela eólica *offshore* é viável, gerando o dobro ou mais de energia elétrica do que a eólica *onshore*. A medida que os custos forem reduzindo, consequentemente, os lucros irão aumentando, tornando os projetos mais atrativos. A expectativa de retorno deste alto investimento é esperada para um período a médio ou longo prazo.

Para os trabalhos futuros, fica a sugestão de que se traga um estudo sobre o reflexo do impacto da geração de energia eólica *offshore* na economia do Brasil: detalhes sobre as medidas de redução de custos nos processos de produção, tipos de impostos criados, reajustes de custos passados aos consumidores, etc.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Disponível em: < <https://antigo.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 24 de jun de 2022.

BLYTH. **Offshore demonstrator wind farm**. EDF Renewables, [S.I.], 2019. Disponível em: <https://www.edf-re.uk/our-sites/blyth>. Acesso em: 23 abr. 2020.

BNAMERICAS. **Bnamericas**: destaque projetos eólicos offshore no brasil sob análise ambiental. Disponível em: <https://www.bnamericas.com/pt/analise/destaque-projetos-eolicos-offshore-no-brasil-sob-analise-ambiental>>. Acesso em: 26 de jun de 2022.

BUHL, T. et al. **Load alleviation through adaptive trailing edge control surfaces: ADAPWING overview**. In Scientific proceedings. Bruxelas: European Wind Energy Association (EWEA). 2007. p. 20-23.

BURDOCK, Liz. **Offshore Wind Subsea Cable**: Insights From The Experts. Business Networkfor Offshore Wind, [s.l.], 2020. Disponível em: <https://www.offshorewindus.org/2020/01/16/osw-cable-insights/>>. Acesso em: 15 jul. Disponível em: <https://mlawreview.emnuvens.com.br/mlaw/article/view/6/69>>. Acesso em: 24 de jun de 2022.

BURTON, T. et al. **Wind Energy Handbook**. Chichester: John Wiley & Sons, 2001. 617 p. CNNBRASIL. CnnBrasil:Entenda-como-funciona-a-energia-eolica-offshore-que-e-gerada-no-mar. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/entenda-como-funciona-a-energia-eolica-offshore-que-e-gerada-no-mar/#:~:text=%C3%89%20poss%C3%ADvel%20coloc%C3%A1%2Dlas%20tamb%C3%A9m,permitindo%20esse%20tipo%20de%20gera%C3%A7%C3%A3o>>. Acesso em: 25 jun 2022.

DESENVOLVIMENTO ECONOMICO. **Desenvolvimento econômico**: usp desenvolve rotor para produção de energia eólica. Disponível em: <https://www.desenvolvimentoeconomico.sp.gov.br/usp-desenvolve-rotor-para-producao-de-energia-eolica/>>. Acesso em: 02 de out de 2022.

DIARIODOCOMERCIO. **Diário do comércio**: ocean winds ingressa no brasil com 15 gw em projetos de eólicas offshore. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/negocios/ocean-winds-ingressa-no-brasil-com-15-gw-em-projetos-de-eolicas-offshore/>>. Acesso em: 20 de out de 2022.

EPBR. **Epbr**: eólicas offshore projetadas para o brasil chegam a 106 GW. Disponível em: <https://epbr.com.br/eolicas-offshore-projetadas-para-o-brasil-chegam-a-106-gw/>>. Acesso em: 05 de out de 2022.

FERREIRA, T. V. B. **Roadmap Eólica Offshore Brasil**. Brasília: [s.n.] 2020.

FULTON, G.R. et. al. **Semi-Submersible Platform and Anchor Foundation Systems for Wind Turbine Support**. California: [s.n.]. 2005. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/40282.pdf>>. Acesso em: 14 jul. 2020.

GABRIEL, Rafael. **Viabilidade Econômica para Escolha de Tecnologia em Projeto de Energia Eólica Offshore**. Disponível em: <http://iepuc.puc-rio.br/dados/files/185121-1-Rafael-Gabriel.pdf>>. Acesso em: 26 de jun de 2022.

GAZETADOPOVO. Disponível em:<<https://apps.gazetadopovo.com.br/ger-app-webservice/webservices/iframeHttps/codigo/960>>. Acesso em: 26 de jun de 2022.

IBERDROLA. **Iberdrola:** como funcionam os parques eólicos offshore. Disponível em:
<<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/como-funcionam-os-parques-eolicos-offshore>>. Acesso em: 27 de jun de 2022.

ISLAM et. al. **Power converters for wind turbines:** Current and future development. [s.l.]:[s.n.]. 2013.

LARSEN, Jens H. **The world's largest off-shore windfarm**, Middelgrunden 40 MW. Wels:Copenhagen Environment and Energy Office. 2001.

MODESTO, Laura I.; FREITAS, Pedro L. de Paiva. **Energia Eólica Offshore**. Rio de Janeiro:CIAGA. 2020

OFFSHOREWIND.BIZ. **O primeiro parque eólico offshore do mundodesaparece do horizonte**(vídeo). Disponível em:
<<https://www.offshorewind.biz/2017/09/06/worlds-first-offshore-wind-farm-disappears-from-horizon-video/>>. Acesso em: 23 de out de 2022.

PERFILENEGIA. **Perfil energia: evolução da energia eólica**. Disponível em:
<<https://perfilenergia.com.br/evolucao-da-energia-eolica/>>. Acesso em: 24 de jun. de 2022.

PETROBRAS. **Petrobras:** estamos desenvolvendo o primeiro projeto piloto de energia eólicaoffshore do Brasil. Petrobras, 22 ago. 2018. Disponível em:
<<https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/estamos-desenvolvendo-o-primeiro-projeto-piloto-de-energia-eolica-offshore-do-brasil.htm#:~:text=Estamos%20desenvolvendo%20o%20primeiro%20projeto%20piloto%20de%20energia%20e%C3%B3lica%20offshore%20do%20Brasil,-22.ago.2018&text=A%20energia%20e%C3%B3lica%2C%20que%20utiliza,pela%20hidroeleticidade%20e%20pela%20biomassa>>. Acesso em: 09 ago. 2020.

QUANTAGERACAO. **Quanta geração: energia eólica conheça o processo**. Disponível em:
<<https://quantageracao.com.br/energia-eolica-conheca-o-processo/>>. Acesso em: 27 de jun de 2022.

RAMPIONOFFSHORE. **Rampionoffshore:** offshore-progress. Disponível em:<
<https://www.rampionoffshore.com/wind-farm/construction/offshore-progress/>>. Acesso em: 26 de jun de 2022

RIBEIRO, C. M. S., **Construção de parques eólicos marítimos:** processos e direção de obra. Porto: Universidade do Porto. 2015.

SILVA, A. J. V. de C. **Potencial eólico offshore no Brasil:** localização de áreas nobres atravésde análise multicritério. Rio de Janeiro: UFRJ. 2019.

SILVA, E. W. **Licenciamento ambiental federal de complexos eólicos offshore**: Avaliação de Impacto Ambiental de Complexos Eólicos Offshore. [s.l.]: IBAMA, 2019.

TAVARES, B. J. L., **Parques Eólicos Offshore**: Estudo de soluções de interligação do tipo HVAC e HVDC. Porto: Universidade do Porto. 92f.2010.

Valencio, Nelson. **HVDC pode ser usada em transmissão eólica offshore no Brasil**. EnergiaHoje, 2022. Disponível em:<<https://energiahoje.editorabrasilenergia.com.br/hvdc-pode-ser-usada-em-transmissao-eolica-offshore-no-brasil/#:~:text=O%20Brasil%20tem%20tuudo%20para,projetados%20continua%20apenas%20no%20papel>>. Acesso em: 27 de out de 2022.

VESTAS. **Vestas:V236-15MW**. Disponível em:<<https://www.vestas.com/en/products/offshore/V236-15MW/V236-15MW>>. Acesso em : 11 de nov de 2022.

WINDBOX. Windbox: **curva de potência**. Disponível em:<<http://windbox.com.br/blog/curva-de-potencia/#:~:text=A%20curva%20de%20pot%C3%Aancia%20de,mastro%20na%20nacele%20do%20aerogerador>>. Acesso em: 21 de set de 2022.

WINDEUROPE. Windeurope: **one of the first wind turbines**. Disponível em:<<https://windeurope.org/about-wind/history/timeline/one-of-the-first-wind-turbines-2-2-2-2-2-2/>>. Acesso em: 26 jun de 2022.