

MARINHA DO BRASIL
ESCOLA DE GUERRA NAVAL
MESTRADO PROFISSIONAL EM ESTUDOS MARÍTIMOS

JORGE GUILHERME DE JESUS DE PAIVA

PANORAMA DA ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NO MUNDO
E PERSPECTIVAS PARA O BRASIL

Rio de Janeiro
2021

JORGE GUILHERME DE JESUS DE PAIVA

PANORAMA DA ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NO MUNDO
E PERSPECTIVAS PARA O BRASIL

Relatório Técnico apresentado ao Curso de Mestrado Profissional em Estudos Marítimos da Escola de Guerra Naval, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Estudos Marítimos.

Rio de Janeiro
2021

P149p Paiva, Jorge Guilherme de Jesus de
Panorama da energia eólica offshore no mundo e perspectivas para o Brasil ./
Jorge Guilherme de Jesus de Paiva. - Rio de Janeiro, 2021.
115 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Escola de Guerra Naval, Programa de Pós-Graduação
em Estudos Marítimos (PPGEM), 2021.

Orientador : Thauan dos Santos

Bibliografia : f. 100- 113

1. Economia do mar. 2. Energia no mar. 4. Energia eólica offshore 5. Matriz
Elétrica Brasileira. I. Escola de Guerra Naval (Brasil). II. Título.

CDD 333.92

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária
Cremilda Santos – CRB7/3200
Biblioteca da Escola de Guerra Naval

JORGE GUILHERME DE JESUS DE PAIVA

PANORAMA DA ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NO MUNDO
E PERSPECTIVAS PARA O BRASIL

Relatório Técnico apresentado ao Curso de Mestrado Profissional em Estudos Marítimos da Escola de Guerra Naval, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Estudos Marítimos.

Aprovado em 24 de Maio de 2021.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Thauan dos Santos
Doutor do PPGEM-EGN

Prof. Dr. Nival Nunes de Almeida
Doutor do PPGEM-EGN/UERJ

Prof. Dr. Milad Shadman
Doutor da COPPE/UFRJ

Prof. Dr. Nivalde José de Castro
Doutor do IE/UFRJ

Dedico este trabalho primeiramente a Deus (pelo infinito Amor), ao meu saudoso padrinho José Carlos Ramos Machado, familiares, professores e amigos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Doutor Thauan dos Santos, por sua dedicação em colaborar fazendo o maior esforço possível para transmitir o seu conhecimento e compartilhar a visão de outros autores me tornando mais capacitado e confiante para a abordagem e concretização deste trabalho.

Aos Professores Doutor Nival Nunes de Almeida, Doutor Milad Shadman, Doutor Nivalde José de Castro, Doutor Alexandre Hamilton Oliveira Santos e Doutor Segen Farid Estefen que ajudaram de maneira determinante meu crescimento acadêmico/pessoal através de disciplinas/eventos realizados que foram essenciais na elaboração deste relatório.

Ao dedicado Corpo Docente, aos colaboradores da Secretaria, aos meus queridos colegas do Programa de Pós-Graduação e Estudos Marítimos da Escola de Guerra Naval pela convivência e amizade; estivemos dois anos compartilhando experiências e aprendizados: o primeiro de modo presencial e o último à distância por medidas de distanciamento social; entretanto, acredito que a perseverança pelo conhecimento foi algo comum a todos durante esse importante período de nossas vidas.

RESUMO

Os debates sobre energias renováveis e eficiência energética exercem cada vez maior importância na agenda (inter)nacional, particularmente no contexto da Agenda 2030 e dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), da Organização das Nações Unidas (ONU). Como consequência, o mar passou a ser reconhecido como fonte de exploração/exploração de diferentes recursos energéticos e minerais, bem como meio para desenvolvimento de diferentes atividades econômicas – reforçando a relevância da Economia do Mar. Recentes estudos apontam destaque para energia eólica *offshore* para o futuro da geração de energia no ambiente marítimo tanto em potenciais de geração, quanto em custo-benefício aos países que a adotaram. Sendo assim, este relatório busca retratar através de pesquisa exploratória e análises documentais, se as fontes das gerações eólica de energia e seus projetos de desenvolvimento no mar podem ser uma boa alternativa para atender à demanda energética brasileira. Dessa maneira, caberá ao relatório proposto identificar o panorama internacional do setor, a partir da análise das experiências internacionais e quais as possibilidades mais viáveis e perspectivas para o Brasil. As demandas de energia e as características naturais que o Brasil possui são favoráveis aos projetos de pesquisa e desenvolvimento, que, em vista dos aspectos de extensão marítimos não aproveitadas, poderiam ser de grande utilidade não somente para a diversificação da nossa matriz elétrica, mas para melhor inserir o Brasil no contexto dos Programas Internacionais de Desenvolvimento Sustentáveis, entre outros benefícios como integração, economia, empregabilidade e nos acordos de sustentabilidade.

Palavras-chave: Energia Eólica *Offshore*; Economia do Mar; Matriz Elétrica Brasileira; Energia do Mar; Energia no Mar.

ABSTRACT

The debates regarding renewable energies and energy efficiency are increasingly important on the (inter)national agenda, particularly in the context of the United Nations (UN) Agenda 2030 and Sustainable Development Goals (SDGs). As a consequence, the sea has come to be recognised as a source of exploration/exploitation of different energy and mineral resources, as well as a means for the development of different economic activities - reinforcing the relevance of the Sea Economy. Recent studies highlight the importance of offshore wind energy for the future of energy generation in the maritime environment both in generation potentials and in cost-benefit to the countries that have adopted it. Therefore, it seeks to portray, through exploratory research and documentary analysis, whether the sources of wind power generation and their development projects at/in the sea can be a good alternative to meet the Brazilian energy demand. Thus, it will be up to the proposed report to identify the international panorama of the sector, based on the analysis of international experiences and which are the most viable possibilities and prospects for Brazil. The energy demands and natural characteristics that Brazil has are favorable to research and development projects, which in view of the maritime extension aspects not used in this sense, could be of great use not only for the diversification of our electrical matrix, but for better to insert Brazil in the context of the International Sustainable Development Programs, among other benefits such as integration, economy, employability and sustainability agreements.

Keywords: Offshore Wind Energy; Economics of the Sea; Brazilian Energy Matrix; Energy from Sea; Energy at Sea.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Os ODS..... | 22 |
| Figura 2.2 – Comparação de custo relativo de tecnologias de fundação <i>offshore</i> | 35 |
| Figura 2.3 – Diferentes modelos para desenvolvimento e construção de usinas eólicas <i>offshore</i> | 36 |
| Figura 2.4 – Evolução das turbinas eólicas e marcos dos projetos <i>offshore</i> | 37 |
| Figura 2.5 – Linha do tempo com principais marcos do setor eólico <i>offshore</i> a nível global | 38 |
| Figura 3.1.1 – O processo de arrendamento no Reino Unido..... | 49 |
| Figura 3.1.2 – Síntese do processo de arrendamento no Reino Unido..... | 50 |
| Figura 3.1.3 – Mapa de parques eólicos <i>offshore</i> do Reino Unido..... | 52 |
| Figura 3.2.1 – Mapa de parques eólicos <i>offshore</i> da Alemanha (Mar do Norte)..... | 57 |
| Figura 3.2.2 – Mapa de parques eólicos <i>offshore</i> da Alemanha (Mar Báltico)..... | 57 |
| Figura 3.3.1 – Síntese do processo de arrendamento no China..... | 61 |
| Figura 3.4.1 – Síntese do processo de arrendamento no Holanda..... | 65 |
| Figura 3.4.3 – Mapa de parques eólicos <i>offshore</i> do Holanda..... | 66 |
| Figura 3.5.1 – Síntese do processo de arrendamento na Bélgica..... | 69 |
| Figura 3.5.2 – Processo de consentimento de parques eólicos <i>offshore</i> na Bélgica..... | 70 |
| Figura 3.5.3 – Mapa de parques eólicos <i>offshore</i> da Bélgica..... | 72 |
| Figura 4.1 – Instituições do SEB..... | 80 |
| Figura 4.2 – Sistema de Transmissão de Energia..... | 82 |
| Figura 4.3 – Matriz Elétrica Mundial e Matriz Elétrica Brasileira (2019)..... | 84 |
| Figura 5.1 – Costa Brasileira e a “Amazônia Azul”..... | 88 |
| Figura 5.2 – Primeiro aerogerador <i>offshore</i> em Guamaré (2018)..... | 89 |
| Figura 5.3 – Etapas da Avaliação do Recurso Eólico <i>Offshore</i> do Brasil..... | 91 |
| Figura 5.4 – Mapa do Potencial Técnico Eólico Brasileiro..... | 92 |
| Figura 5.5 – Ciclo de Vida de uma Usina Eólica <i>Offshore</i> | 93 |

LISTA DE GRÁFICOS E TABELAS

Gráfico 3.1 – Evolução da capacidade eólica *offshore* instalada entre 2015 e 202044

Tabela 2.1 – Comparação entre diferentes modos de geração da energia do/no mar.....31

Tabela 3.1 – *Ranking* global de capacidade instalada de energia eólica *offshore*.....43

Tabela 3.2 – *Ranking* de países e dados técnicos.....75

Tabela 4.1 – Mudanças no SEB.....78

Tabela 5.1 – Órgãos/entidades envolvidas no ciclo de vida das usinas eólicas *offshore*...94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------------|---|
| ABEMAR | Associação Brasileira de Eólicas Marítimas |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| BWEA | <i>British Wind Energy Association</i> |
| BWE | <i>Bundesverband Windenergie</i> |
| <i>CfD</i> | <i>Contract for Difference</i> |
| CGEE | Centro de Gestão e Estudos Estratégicos |
| EGN | Escola de Guerra Naval |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| ELETROBRAS | Centrais Elétricas Brasileiras S.A. |
| EUA | Estados Unidos da América |
| <i>FiT</i> | <i>Feed-in-Tariff</i> |
| <i>FiP</i> | <i>Feed-in-Premium</i> |
| GEE | Gases de Efeito Estufa |
| GW | Gigawatt |
| <i>GWEC</i> | <i>Global Wind Energy Council</i> |
| <i>IEA</i> | <i>International Energy Agency</i> |
| <i>IRENA</i> | <i>International Renewable Energy Agency</i> |
| kW | Kilowatt |
| <i>LCOE</i> | <i>Levelised Cost of Energy</i> |
| MB | Marinha do Brasil |
| MMA | Ministério do Meio Ambiente |
| MME | Ministério de Minas e Energia |
| MW | Megawatt |
| NREL | <i>National Renewable Energy Laboratory</i> |
| ODS | Objetivos de Desenvolvimento Sustentável |
| OI | Organização Internacional |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| P&D | Pesquisa e Desenvolvimento |
| PPGEM | Programa de Pós-Graduação em Estudos Marítimos |
| PNUD | Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento |
| PPP | Parceria Público-Privada |
| SEB | Setor Elétrico Brasileiro |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------------|------------------------------|
| SIN | Sistema Interligado Nacional |
| UE | União Europeia |
| <i>WEC</i> | <i>World Energy Council</i> |
| ZEE | Zona Econômica Exclusiva |

SUMÁRIO

| | |
|--|------------|
| 1. INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1. Visão Geral | 13 |
| 1.2. O Tema e Objetivos de Pesquisa | 16 |
| 1.3. Estrutura do Relatório | 16 |
| | |
| 2. TRANSIÇÃO ENERGÉTICA ATUAL E O PAPEL DO MAR | 17 |
| 2.1. Transição Energética | 19 |
| 2.2. Energias Renováveis DO/NO Mar | 24 |
| 2.2.1. <i>Energias Renováveis DO Mar</i> | 25 |
| 2.3. Energia Eólica Offshore | 34 |
| | |
| 3. PANORAMA GLOBAL DA ENERGIA EÓLICA OFFSHORE | 39 |
| 3.1. Reino Unido | 45 |
| 3.1.1. <i>Processo de Licitação/Consentimento</i> | 48 |
| 3.1.2. <i>Custo de energia</i> | 50 |
| 3.2. Alemanha | 53 |
| 3.2.1. <i>Processo de Licitação/Consentimento</i> | 55 |
| 3.2.2. <i>Custo de energia</i> | 56 |
| 3.3. China | 58 |
| 3.3.1. <i>Processo de Licitação/Consentimento</i> | 59 |
| 3.3.2. <i>Custo de energia</i> | 61 |
| 3.4. Holanda | 63 |
| 3.4.1. <i>Processo de Licitação/Consentimento</i> | 63 |
| 3.4.2. <i>Custo de Energia</i> | 65 |
| 3.5. Bélgica | 67 |
| 3.5.1. <i>Processo de Licitação/Consentimento</i> | 68 |
| 3.5.2. <i>Custo de energia</i> | 71 |
| | |
| 4. BREVE APRESENTAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO | 77 |
| 4.1. As instituições do Setor Elétrico Brasileiro (SEB) | 79 |
| 4.2. O Setor Elétrico Brasileiro (SEB) | 82 |
| 4.3. Matriz Elétrica Brasileira | 84 |
| | |
| 5. PERSPECTIVAS PARA O BRASIL | 88 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 98 |
| REFERÊNCIAS | 100 |
| ANEXOS | 114 |

1. INTRODUÇÃO

Esta introdução será composta de três breves subseções: inicialmente, a Subseção 1.1 (Visão Geral) anuncia as principais discussões relacionadas ao tema e metodologia. Em continuidade, a Subseção 1.2 trata do tema e dos objetivos de pesquisa e, por fim, a Subseção 1.3 apresenta a Estrutura do Relatório.

1.1. Visão Geral

Espera-se que a energia eólica *offshore*, que forneceu apenas 0,3% da geração global de energia em 2018 (IEA, 2019), expanda sua participação na matriz elétrica/energética global de maneira significativa nas próximas duas décadas, sendo esta a principal justificativa para o relatório. Como consequência, os esforços para descarbonizar os sistemas de energia e reduzir a poluição do ar serão aumentados, à medida em que se tornar uma parte crescente do fornecimento de eletricidade (REIS, 2013). Dadas as características naturais que o Brasil possui, favoráveis aos projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) no contexto marítimo, é necessário que o país conheça e avalie as potencialidades que existem, particularmente considerando os benefícios oferecidos por fontes energéticas renováveis, como integração, redução de custos e segurança no sistema energético. Considerado o estado da arte das energias renováveis no/do mar no país, destaca-se a participação da eólica *offshore*, foco da presente pesquisa.

Dessa forma, há necessidade de analisar-se a extensão marítima brasileira como possível solução para o futuro da geração sustentável de energia eólica *offshore* no Brasil. Vale destacar que, apesar de o relatório descrever o atual *status* da energia eólica *offshore* no Brasil (e no mundo), não pretende-se ignorar as possíveis abordagens *mix* e interfaces da eólica *offshore* com demais fontes energéticas. Portanto, a Marinha do Brasil (MB), através da Escola de Guerra Naval (EGN), terá a realização do seu primeiro produto de mestrado sobre o tema em questão por meio do relatório submetido ao Programa de Pós-Graduação em Estudos Marítimos (PPGEM). Sendo assim, o PPGEM/EGN, por meio desse relatório, proporcionará disseminação de informações referentes à cultura marítima na interação entre meio acadêmico e à sociedade.

Dessa maneira, no que se refere ao objeto, a pergunta de pesquisa é: “Quais as barreiras existentes para a promoção da energia eólica *offshore* no Brasil?”. Diante do fato de que nas últimas décadas, tem havido maior pressão (inter)nacional para o aumento da participação das fontes renováveis na matriz energética, em processo de substituição gradativa às energias não-renováveis - uma das alternativas para se promover o processo de transição energética pode se dar a partir do uso energético dos mares, por exemplo por meio da energia eólica *offshore*.

A metodologia de pesquisa realizada é de natureza qualitativa, uma vez que a mesma lida com dados que não podem ser facilmente mensuráveis para o relatório, como características naturais, facilidades locais e interação entre iniciativa pública e privada nos diferentes países analisados. Contudo, destaca-se que em algumas partes haverá apresentação e análise de dados coletados a partir de agências internacionais, como Agência Internacional de Energia (IEA, sigla em inglês) e da Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, sigla em inglês), bem como de agências e ministérios dos respectivos países analisados.

O método comparativo será usado tanto para viabilizar comparações de diferentes variáveis e fenômenos nos países considerados, no presente, no passado, ou entre os existentes e os do passado, quanto entre sociedades de iguais ou de diferentes estágios de desenvolvimento (LAKATOS; MARCONI, 2003). Para as autoras, tal método permite analisar o dado concreto, deduzindo elementos constantes, abstratos e gerais. Outrossim, constitui verdadeira “experimentação indireta” e pode ser empregado em estudos de largo alcance. Dessa maneira, no procedimento serão utilizados métodos comparativos aos países desenvolvidos em energia eólica *offshore* por haver diversidade de informações para tal, por exemplo: (i) fatores de incentivo; (ii) ameaças/desafios; (iii) custos/investimentos; entre outros fatores relevantes para as análises.

Yin (2001) destaca, ainda, que o estudo de caso permite uma investigação para se preservar as características holísticas e significativas dos eventos, descrevendo aplicações aos ciclos de vida individuais, processos organizacionais e administrativos, mudanças ocorridas em regiões urbanas, relações internacionais e a maturação de alguns setores. Nesse sentido, no que se refere ao caso do Brasil, pretende-se fazer um panorama das alternativas tecnológicas e das barreiras existentes para promoção da energia eólica *offshore*, a partir da análise das experiências internacionais mais avançadas no setor. Sendo assim, a partir do método comparativo, serão identificadas as principais variáveis que devem ser consideradas e

analisadas para facilitar a tomada de decisão dos *stakeholders* envolvidos nesse setor, considerando especificamente o caso brasileiro.

Portanto, para o desenvolvimento do relatório, será utilizada pesquisa exploratória, seja através de dados bibliográficos, documentais e/ou experimentais. O relatório constará de: (i) sistema de coleta de dados primários e secundários; e (ii) técnicas de análises qualitativas em alguns aspectos (políticos e sociais) e quantitativas (geração, investimentos e custos). Dentre as fontes de informação, pode-se citar: livros, teses e artigos (inter)nacionais, informativos de instituições oficiais dos países analisados e organizações internacionais (OIs) ligadas ao tema e entrevistas com profissionais de diferentes empresas brasileiras do setor de energia.

A inserção das energias renováveis nas matrizes elétricas/energéticas dos países é um dos temas de maior destaque nas discussões atuais de âmbito mundial, devido ao processo de evoluções tecnológicas, necessidade de maior eficiência energética e/ou através do cumprimento de metas e objetivos em acordos ou agendas de sustentabilidade – dentre os quais pode-se dar maior destaque à Agenda 2030, os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) promovidos pela Organização das Nações Unidas (ONU). No que se refere aos ODS, constata-se a importância do uso adequado dos recursos marítimos e melhor aproveitamento potencial dos mesmos.

Destaca-se, portanto, a Economia do Mar – um conceito estratégico, que poderá trazer resultados positivos a setores relacionados ao uso do Mar, como, por exemplo, a energia – já que as características naturais que o Brasil possui são favoráveis à maior participação de energias no/do mar na matriz energética nacional, principalmente a partir de fontes renováveis (ondas, marés, gradientes de temperatura, salinidade, eólica e solar *offshore*), conforme será debruçado no relatório. Apesar de o país ter aproximadamente 7.400 km de extensão costeira, há necessidade de se explorar/explotar recursos de relevância estratégica contidos na “Amazônia Azul”¹ perante sua sociedade através de meios adequados.

Dessa maneira, o presente trabalho visa elaborar um histórico da energia eólica *offshore* no mundo e, especificamente, no Brasil, com o objetivo de identificar os principais empecilhos ao aumento dessa participação. Para tal, utilizará dados nacionais e internacionais

¹ Área com 7,4 mil quilômetros de costa que o Brasil tem, sob sua jurisdição e que apenas o país pode explorar economicamente os 3,5 milhões de quilômetros quadrados (km²) de espaço marítimo e que, por conta das riquezas naturais e minerais abundantes, numa comparação à importância da floresta amazônica (MARINHA DO BRASIL, 2019).

publicados por agências e organizações oficiais e em artigos científicos, apresentando uma metodologia de natureza qualitativa-quantitativa.

1.2. O Tema e Objetivos de Pesquisa

O tema do relatório “o uso dos mares para geração de energia no contexto da atual transição energética” é delimitado por experiências internacionais em eólica *offshore* e potencialidades para o caso brasileiro. O objetivo geral deste trabalho acadêmico é mapear as experiências de energia eólica *offshore* no mundo, buscando identificar as perspectivas para o caso brasileiro.

Dessa maneira, os objetivos específicos são: (i) avaliar se o conceito de transição energética tem efetivamente considerado as energias do/no mar como fontes alternativas; (ii) apresentar o conceito da geração de energia eólica *offshore* na atual transição energética; (iii) realizar uma análise comparativa acerca das principais experiências internacionais no setor.

1.3. Estrutura do Relatório

O relatório será composto por seis seções. Após essa breve introdução, a Seção 2: Transição Energética e o Papel do Mar será dividida em duas subseções: (2.1) Transição Energética; e (2.2) Fontes de Energias Renováveis DO/NO Mar; para todos os tipos de geração de energia, serão apresentados os seus modos de funcionamento, vantagens, desvantagens, casos internacionais e experiências brasileiras, quando houver. Será dado maior destaque à Seção 2.2, particularmente focada na Energia Eólica *Offshore*, devido ao avançado desenvolvimento comercial da mesma em relação às demais. Na Seção 3, será feito o Panorama Global da Energia Eólica *Offshore*, através de destaque aos países: (3.1) Reino Unido, (3.2) Alemanha, (3.3) China, (3.4) Holanda e (3.5) Bélgica. Na Seção 4, será feita uma Breve Apresentação do Setor Elétrico Brasileiro e na Seção 5 serão discutidas as Perspectivas para o Brasil. Finalmente, expõem-se na Seção 6 as Considerações Finais do Relatório.

2. TRANSIÇÃO ENERGÉTICA ATUAL E O PAPEL DO MAR

Desde o século XVIII, o setor de energia atua em conjunto com as evoluções tecnológicas (CASTRO; DANTAS, 2016), principalmente após a Primeira Revolução Industrial (séculos XVIII e XIX). A implementação de mudanças nos meios de produção significou um progresso para humanidade – no entanto, foram necessários outros fatores importantes para maior desenvolvimento das nações, como, por exemplo, um insumo particular às suas respectivas indústrias (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). Tal fato gerou, conseqüentemente, a consolidação da energia como condição *sine qua non* aos processos tecnológicos e evolutivos das sociedades (CGEE, 2017), portanto, a partir deste momento, a geração energética trouxe suprimento a novas estruturas. Dessa maneira, resulta que sua utilização é de suma importância histórica aos desenvolvimentos dos Estados em diversos aspectos, como sociais, econômicos, geopolíticos e estratégicos.

Entretanto, neste período de evolução tecnológica utilizavam-se recursos para geração de energia de maneira primária. Ademais, não havia até então quaisquer acordos e/ou metas sustentáveis no contexto das disputas pelo poder. Há, contudo, diversos impactos negativos sobre o meio ambiente decorrentes do uso e da emissão de combustíveis fósseis pela humanidade no decorrer dos anos (MAIDANA; BOGGI, 2009). Apesar disso, vale mencionar que nem todos os países do mundo colaboram efetivamente com os limites de emissões junto à comunidade internacional (e às suas respectivas organizações). O predomínio dos combustíveis fósseis, em primeiro momento, levou à busca por fontes alternativas que pudessem substituir a eventual escassez destas fontes, fato que cresce a cada momento (uma vez que se tratam de energias não renováveis) (EPE, 2019). Acredita-se, portanto, que será essencial para lidar com tais evoluções o estabelecimento de políticas industriais estratégicas que possam consolidar os interesses da sociedade (SICSÚ; CASTELAR, 2009).

Se neste período os processos de produção das nações eram focados nas revoluções industriais, atualmente os mesmos se encaminham às soluções sustentáveis para suas respectivas emissões de gases de efeito estufa (GEE), através da atual transição energética. Dessa forma, o cenário global desde a Crise do Petróleo (1973) tem sido protagonizado por um movimento rumo à geração de energia limpa, ainda que seja necessária uma maior aceleração desse movimento, centrada nas energias renováveis, na eletrificação e na eficiência

energética (GIELEN *et al.*, 2019). Em paralelo a maior pressão ambiental, destaca-se que mudanças climáticas, desenvolvimento industrial, e globalização trouxeram novas e crescentes demandas de energia (SHAHBAZ *et al.*, 2017), ocasionando a necessidade de se buscar novas alternativas (não se restringindo às energias não renováveis) para que se possa ampliar a capacidade de geração e atender aos novos padrões de consumo exigidos.

Como consequência, o mar passou a ser reconhecido como fonte de exploração de diferentes recursos energéticos e minerais, bem como meio para desenvolvimento de diferentes atividades econômicas – reforçando a relevância da Economia do Mar (CARVALHO, 2018; SANTOS, 2019). Estudos relacionados ao setor de energia sustentável já apontam significativo aumento de investimentos e tendências para o futuro da geração de energia no ambiente marítimo nos últimos anos, com destaque para energia eólica *offshore* tanto em potenciais de geração, quanto em custo-benefício aos países que a adotaram (EPE, 2017; IEA, 2019). Destaca-se que os principais países que se aprimoraram na geração de energia eólica *offshore* desenvolveram esta tecnologia aliando-a ao espaço disponível em suas respectivas costas reverberando o fator segurança energética em seus respectivos cenários. Entre as nações que atenderam percentuais de suas demandas energéticas, encontram-se Dinamarca, Reino Unido, Alemanha, Holanda, Bélgica e China (IRENA, 2018; GWEC, 2018).

A presente seção, portanto, visa a analisar conceitos-chaves utilizados no relatório, sendo dividido em três seções. A seção 2.1 será dedicada à transição energética, através da qual será exposto o contexto do atual cenário mundial. Em seguida, a seção 2.2 analisará de maneira comparada as energias DO/NO mar evidenciando a pouca participação dessas gerações de energia na matriz energética global. Esta seção será subdividida em duas subseções: (i) 2.2.1. energias DO mar; e (ii) 2.2.2. energias NO mar. Nelas, serão descritos o funcionamento e as vantagens/desvantagens destes modos de geração de energia. Por fim, a seção 2.3 tratará de maneira específica e exclusiva da energia eólica *offshore*, que possui maior abrangência de aplicação entre todos os tipos de geração de energia devido ao avançado desenvolvimento comercial da mesma.

2.1. Transição Energética

A transição energética pode ser entendida como uma mudança estrutural no sistema de fornecimento e utilização de energia. Em alguns momentos, esta transição é consequência de transformações tecnológicas e econômicas; em outros, é o produto de decisões políticas (SABBATELLA; SANTOS, 2020). Sendo assim, há diversas transições energéticas anteriormente sucedidas, conforme sugere a história das sociedades, de modo que as mudanças na gama de fontes energéticas levam várias décadas para serem consolidadas, como por exemplo: 65 anos separam 1950, altura em que o gás atingiu 10% da contribuição energética, e o momento em que é estimado como combustível dominante (CARRIZO *et al.*, 2016).

De acordo com Sabbatella e Santos (2020), pode-se apontar três importantes aspectos que caracterizam e sustentam a atual transição energética: (i) eficiência energética, que possibilita o crescimento econômico com menor consumo de energia; (ii) energias renováveis, que emergiram como as fontes de energia que mais crescem e representam cerca de um quarto da geração global de eletricidade; e (iii) eletrificação, pois a eletricidade é responsável por 19% do consumo final total de energia, esperando-se que sua participação cresça à medida que a eletrificação dos setores de uso final ocorre (IRENA, 2019). Sugere-se, para consecução de melhores resultados na transição, que exista sinergia mútua entre os dois primeiros componentes citados anteriormente (IRENA, 2018a). O aspecto eficiência energética consiste em todas as alterações que resultam em redução de energia utilizada para determinado serviço/atividade de energia, que pode resultar em melhor organização e gerenciamento ou melhoria da eficiência econômica do setor (WEC, 2004).

Dados o conceito e sua relevância, a eficiência energética é fundamental ao setor de energia não somente por influenciar nos processos de transição energética, como também nas políticas/resultados da segurança energética – outro conceito-chave para o setor (SELVAKKUMARAN; LIMMEECHOKCHAI, 2013). A segurança energética possui diversas definições oferecidas por pesquisadores e formuladores de políticas, sendo uma área estudada ativamente nos últimos anos (SANTOS, 2018; ANG *et al.*, 2015). Apesar disso, em maior ou menor grau os conceitos discorrem sobre a disponibilidade ininterrupta de fontes de energia a um preço acessível (IEA, 2014) ou tópico universal que molda políticas e

regulamentos para atingir níveis mais altos de segurança na energia e dessa maneira, proporciona uma vida melhor às sociedades (AZZUNI; BREYER, 2017). Faz-se, portanto, essencial entender-se a importância da segurança energética para o Estado, pois novas perspectivas sociais, econômicas e ambientais precisam ser consideradas na política e planejamento de energia. Caso estes sejam implementados de maneira satisfatória, podem significar, conseqüentemente, uma melhoria nos processos de transição energética.

No tocante ao seu campo de pesquisas, as transições energéticas concentram-se na trajetória de mudança e, portanto, procuram descobrir as origens, padrões e mecanismos que as conduzem (WILLIAMS; DOYON, 2019). Dessa maneira, as transições envolvem não apenas mudanças técnicas, mas mudanças no comportamento do consumidor, mercados, instituições, infra-estruturas, negócios, modelos e discursos culturais (GEELS *et al.*, 2016). A atual transição energética, foco dessa pesquisa, está relacionada à mitigação de emissões de gases de efeito estufa (GEE) em nível global e a fatores/desafios como evoluções tecnológicas, necessidade de maior eficiência energética, e/ou através do cumprimento de metas e objetivos em acordos ou agendas de sustentabilidade. Os governos e as sociedades civis propõem a mitigação das emissões de CO₂ geradas pela queima de combustíveis fósseis (petróleo e carvão, por exemplo) e a inserção de fontes de energia limpa como temas prioritários nesta discussão.

Verificam-se, neste processo evolutivo, pressões sugeridas e/ou impostas por iniciativas governamentais na direção à mitigação de emissões de GEE, aliadas ao desenvolvimento tecnológico. Contudo, nesse contexto da atual transição energética, o “uso energético” do mar surge diante da escassez de terras ou outras restrições por preocupações públicas como alternativa para suprir suas demandas energéticas. Vale destacar, no entanto, que, nesse contexto da transição energética, este não é um privilégio comum a todos os países no planejamento de inovação dos seus sistemas (POUDINEH *et al.*, 2017). Assim, países com maior acesso a fontes renováveis e limpas possuem mais alternativas para fazer frente aos desafios da atual transição energética de baixo carbono. Dessa maneira, a transição energética é um caminho para a transformação do setor energético global de carbono fóssil em carbono zero na segunda metade deste século (IRENA, 2019), que pode, portanto, ser acelerada através da produção de energia no/do mar.

Nesse novo contexto, tem-se que um dos principais desafios da política energética atual é o *trade-off* existente entre segurança energética e mudanças climáticas (VALDÉS

LUCAS *et al.*, 2016), em que se destaca a necessidade de mitigação dos impactos ambientais e das emissões de GEE. Em vista dos esforços no gerenciamento desse *trade-off*, a segurança energética aparece frequentemente como principal solução para os problemas enfrentados pelos administradores públicos. Contudo, acredita-se que seja improvável existir a atual transição energética de maneira isolada, uma vez que ela demanda a criação de políticas e programas específicos de fomento em âmbito global, mitigando as emissões globais de GEE (ARENT *et al.*, 2017).

Nesse contexto de transição energética, destaca-se o “Relatório Anual de Promoção a Transição Energética Eficaz”, do Fórum Econômico Mundial (WEF, sigla em inglês). No *ranking* proposto pelo relatório, o Brasil ocupa o 46º lugar entre 115 países analisados, indicando a necessidade de melhor preparação doméstica para enfrentar essa transição (WEF, 2019). Nele, foram consideradas basicamente duas dimensões para a análise de cada país, dispostas em diversas subcategorias:

- 1) Desempenho do Sistema – que trata a capacidade de a arquitetura de energia atual dos países de fornecer os três imperativos do triângulo energético: (a) desenvolvimento e crescimento econômico; (b) acesso à energia e segurança energética; e (c) acesso à energia e sustentabilidade ambiental (WEF, 2019). Nessa dimensão, o desempenho do sistema brasileiro está em 19º lugar, demonstrando que este atingiu uma pontuação acima das médias globais; e
- 2) Preparação para Transição – mede seis subcategorias dispostas em: (a) instituições e governança; (b) capital humano e participação do consumidor; (c) infraestrutura e ambiente de negócios inovadores; (d) capital e investimentos; (e) regulação e comprometimento político; e (f) estrutura do sistema energético. Nessa dimensão, há pontos críticos nos quais o Brasil menos pontua, por exemplo: capital e investimentos, em que há medição do grau de construção de renováveis e que o país está em 100º colocado, reverberando o fato de que os impactos da energia na economia brasileira estão aquém das médias globais. Assim, colabora com o 82º lugar na “preparação para a transição” do Brasil e, conseqüentemente, com a pontuação geral brasileira do *ranking* proposto pelo relatório.

Quando se discute transição energética atual, via de regra são citados diferentes temas e estratégias, como segurança, eficiência, armazenamento e mitigação das emissões

(SABBATELLA; SANTOS, 2020). Nesse aspecto, os debates sobre transição energética e energias renováveis exercem importância na agenda (inter)nacional na atualidade, particularmente no contexto da Agenda 2030 e dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) e Acordo de Paris, da Organização das Nações Unidas (ONU).

No ano de 2015, surge a Agenda 2030, que engloba 17 ODS interconectados (**Figura 2.1**); destaca-se, contudo: (i) o ODS 14, que tem uma perspectiva ampla de utilização e gestão sustentável dos oceanos, recursos marítimos e ecossistemas relacionados para o desenvolvimento sustentável (SANTOS, 2019); (ii) o ODS 7, ao se tratar de Energias Renováveis, através da importância de “assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos”; (iii) o ODS 13, de ação contra a mudança global do clima; (iv) o ODS 9, de inovação infraestrutura, que propõe construir infraestrutura resiliente, promover a industrialização inclusiva e sustentável, e fomentar a inovação; e (v) ODS 11, que consiste em transformar cidades e os assentamentos humanos em locais inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis (PNUD, 2015).



Figura 2.1: Os ODS

Fonte: *Site* da Organização das Nações Unidas, 2015.

No que se refere aos ODS, constata-se a importância do uso adequado dos recursos marítimos e melhor aproveitamento potencial dos mesmos, conforme anteriormente citado no conceito de Economia do Mar. No tocante ao Acordo de Paris (2015), o relatório da Agência

Internacional de Energias Renováveis (IRENA, 2019) aponta que a transformação do sistema global de energia precisa acelerar substancialmente para atender aos seus objetivos. Esses objetivos são manter o aumento da temperatura média global “bem abaixo” de 2°C e, idealmente, limitar o aquecimento a 1,5° C no século atual, em comparação com os níveis pré-industriais. Para reverberar este fato, pode se demonstrar a prospecção de cenários referentes ao aumento global médio de temperatura (em graus centígrados); acordos/agendas de sustentabilidade internacionais; e perspectivas de desempenho da energia do mar, realizado pela IEA (Agência Internacional de Energia, sigla em inglês). Para tal análise, há três diferentes cenários de políticas a longo prazo, conforme a seguir (WEC, 2017):

- 1) Cenário de novas políticas - leva em consideração as políticas e medidas de implementação que afetam os mercados de energia adotadas em meados de 2015 (incluindo componentes relacionados a energia de compromissos climáticos apresentados antes da COP21), juntamente com as intenções políticas declaradas relevantes;
- 2) Cenário de políticas atuais - leva em consideração apenas as políticas promulgadas em meados de 2015; e
- 3) Cenário 450 - representa um caminho para a meta climática de 2° C que pode ser alcançada promovendo tecnologias próximas à comercialização.

Pode-se concluir através deste estudo, que caso as políticas/medidas adotadas em 2015 (com destaque o Acordo de Paris) não sejam reavaliadas, não será possível cumprir as metas climáticas de aumento de máximo de 2°C no mundo (SCHLEUSSNER *et al.*, 2016; IEA, 2019a). Ademais, espera-se que a parcela de energia renovável aumente nos três cenários sugeridos, entretanto é considerada a sua participação em maior grau no Cenário 450, com 53% da geração de energia a partir de fontes renováveis até 2040, com a energia do mar contribuindo com 93 TWh por ano nesse cenário, sendo 36 GW de capacidade instalada. Comparado aos 1 TWh gerados em 2013, isso representaria um grande salto em termos de implantação. No entanto, dada a vantagem que outros tipos de energias renováveis desfrutam em termos de custo e maturidade da cadeia de suprimentos, ainda é esperado que a energia do mar desempenhe um papel relativamente menor nesse cenário, representando apenas 0,5% da geração total de energia renovável até 2040 (WEC, 2017).

Destaca-se, portanto, o mar como um ativo estratégico, que poderá contribuir não somente para melhores resultados a setores relacionados ao seu uso, como, no caso em questão, a geração de energia sustentável, como aos objetivos das políticas de transição energética. Nesse sentido, há grandes desafios na implementação de energias do/no mar, devido (i) de fomento dos atores setoriais; e/ou (ii) à carência histórica de políticas públicas e regulamentação, que, muitas vezes, dificultam a atração de investimentos por parte das empresas multinacionais ou nacionais com potencial técnico para contribuir com o desenvolvimento de exploração e exploração.

Vale destacar que os *benchmarks*² nos setores mencionados desenvolvem as suas respectivas tecnologias através de diferentes modelos, podendo variar a participação de governos e propriedade privada nos projetos. O desenvolvimento de tais modelos traz impactos na sociedade nos diversos aspectos: econômicos, sociais, políticos, entre outros, independente do modelo de participação implementado, portanto há necessidade de uma visão holística ao se tratar deste patrimônio nacional (BEIRÃO *et al.*, 2018). Nesse contexto, o mar pode ser um dos principais contribuintes para garantir a segurança energética (e elétrica, em particular) na atual transição energética em curso. Há diversas maneiras de captar-se energias renováveis através do/no mar, conforme será visto na próxima seção.

2.2. Energias Renováveis DO/NO mar

Conforme mencionado na seção 2.1, no contexto da atual transição energética em curso há a necessidade de se buscar novas alternativas (não se restringindo às energias não-renováveis convencionais) para que se possa ampliar a capacidade de geração e atender aos novos padrões tanto de consumo exigidos, considerados seus respectivos impactos ambientais e climáticos adversos. No entanto, a disponibilidade de espaço físico terrestre para se construir novas usinas a fontes renováveis no contexto dessa atual transição energética não é

² “*Benchmarks*” são o resultado de uma metodologia específica para a identificação de lições positivas e negativas a serem aprendidas a partir de experiências já desenvolvidas (STEYN, 2015). No caso em questão, consideraremos como os países pioneiros em projetos eólicos *offshore* colaboraram com o desenvolvimento de novas práticas e padrões neste setor através de suas experiências adquiridas ao longo dos anos.

um privilégio comum, de modo que mares e oceanos já têm sido considerados no planejamento dos sistemas energéticos de alguns países.

Nesse sentido, a localização estratégica de usinas para geração de energia do/no mar deve considerar previamente os principais aspectos marinhos locais para a devida efetivação do projeto, como, por exemplo, o fluxo de espécies marinhas ou posicionamento de corais (LAMB *et al.*, 2018). Variáveis de natureza normativa, regulatória e técnica também desempenham um papel fundamental nesse contexto.

Sendo assim, dentre os modos de utilização de energia relacionados ao uso do mar, pode-se separá-los, para melhor compreensão, em dois principais grupos: (i) fontes de energias renováveis DO mar (subseção 2.2.1); e (ii) fontes de energias renováveis NO mar (subseção 2.2.2). O foco do presente relatório está sobre as energias renováveis do/no mar, de modo que não serão analisados, por exemplo, os casos relacionados à exploração de petróleo e gás (P&G) *offshore*. As subseções seguintes, portanto, apresentarão as principais características dos diferentes tipos de energia renováveis no/do mar.

2.2.1. *Energias Renováveis DO mar*

O primeiro grupo utiliza benefícios gerados diretamente a partir da água do mar, nos quais destacam-se:

- i. barragem de marés, produzida através do aproveitamento da energia cinética³ das correntes marítimas;
- ii. ondas, gerada com a energia cinética das ondas, no movimento da água e energia potencial devido à sua altura;
- iii. corrente de maré, que converte a energia cinética das correntes em energia útil;
- iv. corrente de oceano, fornecida a partir de variações entre as distribuições latitudinais de ventos e circulações oceânicas termohalinas⁴;
- v. gradiente de temperatura, que consiste na diferença de temperatura entre diferentes alturas das superfícies do mar; e
- vi. gradiente de salinidade, criada com a diferença de entropia entre a água salgada e

³ é a energia associada ao movimento de um objeto (HALLIDAY *et al.*, 2011).

⁴ consiste no transporte de massas de águas oceânicas associado a diferenças na densidade da água do mar devido a variações de temperatura e salinidade (MACHADO, 2009).

a água doce na geração de energia.

Destaca-se, contudo, que apesar do potencial existente, a energia do mar é responsável pelo menor percentual de eletricidade renovável do mundo e a maioria dos projetos ainda permanece na fase de experimentação (SANTOS, 2019; SHADMAN *et al.*, 2019), de modo que, ainda que haja desenvolvimento de diversas dessas tecnologias no mundo, poucas são comerciais para serem totalmente utilizadas (IRENA, 2018). No entanto, com recursos significativos e bem distribuídos, a participação da energia do mar tem potencial de aumento a longo prazo (IEA, 2019).

Nota-se que somente a energia de barragem de marés é comercialmente viável dentre as energias do mar, sendo os demais em menor escala, apesar de diversos modelos já serem cogitados através de testes para diversos países, principalmente na Europa e Ásia (LEWIS *et al.*, 2011). Na prática, isso significa que as tecnologias das demais energia do mar ainda são conceituais, passam por estágio de pesquisa e desenvolvimento (P&D) ou estão em estágio de protótipo pré-comercial (BEAUDOIN *et al.*, 2010; BEIRÃO *et al.*, 2018).

Apesar de não haver mercado comercial significativa para tecnologias de energia oceânica, há uma série de iniciativas por parte dos governos para promover a implementação das energias, por exemplo: o projeto de Sihwa Lake (Coreia do Sul), entretanto é necessário que os projetos de energia do mar sejam promovidos através de políticas públicas o papel de implementação direta ou por parcerias (KO *et al.*, 2019). Além da tecnologia de amplitude de marés, que já está próxima do estágio de comercialização, pesquisa, projetos de desenvolvimento e demonstração foram liderados por universidades e *startups*, principalmente por tirar proveito do financiamento público.

A energia do mar oferece potencial para redução de emissões de carbono a longo prazo, mas é improvável que faça uma contribuição significativa de curto prazo antes de 2020, devido ao seu estágio inicial de desenvolvimento (LEWIS *et al.*, 2011). No entanto, nos últimos cinco anos, grandes *players* do setor e as concessionárias já começaram a realizar atividades e financiamentos no setor. Este é um passo importante para acelerar a comercialização de tecnologia devido à capacidade dos novos *players* de executar projetos em escala de utilidade (SHADMAN *et al.*, 2019). Nas últimas décadas, houve uma grande evolução de capacidade instalada e projetos de fazendas eólicas *offshore* em detrimento das

demais fontes energéticas no mundo (LEWIS *et al.*, 2011). Apesar disto, são escassas de análises dedicadas à geração energética do mar nas publicações de energias renováveis.

2.2.1.2. Barragem de marés

É um tipo de energia renovável em que a diferença de elevação entre altas e marés baixas pode ser usada para geração de eletricidade (POLIS *et al.*, 2017). O potencial é geralmente extraído através da construção de uma barragem ao longo de um estuário ou rio (SOLEIMANI *et al.*, 2015). Dentre suas principais vantagens, destaca-se o fato de que já há tecnologias desenvolvidas para captação de energia de maré baixa, inferiores a 2 metros (m); que são relativamente previsíveis, com periodicidade diária, quinzenal, semestral e até ciclos anuais ao longo de um período mais longo; e que o alcance das marés é pouco influenciado pelas condições do tempo. Dentre seus principais desafios, estão os custos iniciais relativamente altos relacionados aos desenvolvimentos de diques ou aterros e as implicações ecológicas de recintos ou represamentos; os altos custos de instalação das soluções (IRENA, 2014a).

São atual e comercialmente os modelos mais avançados em captação de energia do mar em operação no mundo, havendo usinas de La Rance, França (240MW), que existe desde 1966; e Sihwa Lake (254 MW), Coreia do Sul, inaugurada em 2011. No final de 2016, a geração global a partir de energia de marés foi de aproximadamente 0,5 gigawatts (GW), dos quais quase 90% foram providos por essas duas usinas (REN21, 2017). Há, em menor escala, a Usina Annápolis Royal (17,8MW), construída em 1980 na Escócia; entre outras em países como China e Rússia (EIA, 2018). No Brasil, há dois projetos a serem testados: Bacanga (Maranhão) e Maracanã (Pará) (SHADMAN *et al.*, 2019).

2.2.1.2. Ondas

Os conversores de energia das ondas capturam a energia cinética contida no movimento das ondas do oceano e a utilizam para gerar eletricidade (IRENA, 2017). Dentre suas principais vantagens, está o fato de apresentar riscos mínimos ao meio ambiente; e possuir grande volume de água do mar para geração de energia. Dentre os principais desafios, estão altos custos de instalação dos equipamentos; e o fato de que as instalações devem ser

fortes e sólidas o suficiente para resistirem às tempestades, ao mesmo tempo em que devem ser sensíveis o bastante para captação da energia das marés (IRENA, 2014).

Esse modelo de geração se encontra em estágio pré-comercial e possui diversos testes realizados em países como: Estados Unidos da América (EUA), Reino Unido, Brasil, Austrália e Dinamarca (LEWIS *et al.*, 2011). No Brasil, foram desenvolvidos dois projetos em diferentes estados: Ilha Rasa (Rio de Janeiro) e Porto do Pecém (Ceará), entretanto há necessidade de continuidade para viabilizar essa tecnologia no futuro (SHADMAN *et al.*, 2019).

2.2.1.3. Corrente de marés

As correntes de maré convertem a energia cinética em energia útil. Os desenvolvimentos tecnológicos são comparáveis ao desenvolvimento de turbinas eólicas, com maior aproveitamento em relação ao ar devido à densidade da água (IRENA, 2014a). Dentre suas vantagens estão: turbinas eólicas de eixo horizontal podem fornecer às turbinas de corrente vantagem para seu desenvolvimento, uma vez que os princípios operacionais são semelhantes; o sistema é efetivo em baixa velocidade de rotação dos geradores. Entretanto seus maiores desafios são: os custos de instalação e descomissionamento; e minimizar os requisitos de subestrutura.

Em nível de aplicação, é o que possui maior quantidade de países interessados nos protótipos e os seus locais mais apropriados identificados são: Europa, Coreia, Canadá, Japão, China, Nova Zelândia e América do Sul (LEWIS *et al.*, 2011).

2.2.1.4. Corrente de oceano

As correntes de oceano são movidas por distribuições latitudinais de ventos e pela circulação oceânica termohalina. São mais lentas, entretanto mais contínuas que as correntes de marés e, embora frequentemente localizadas em locais do fundo do oceano, tendem a operar próximas à superfície. Outra diferença em relação às correntes de maré é que os fluxos são unidirecionais, enquanto a direção inversa da corrente de maré com cada ciclo de inundação e vazante (IRENA, 2014b). Dentre suas vantagens estão: operam de maneira mais contínua do que corrente de maré; operação abaixo do calado dos navios comerciais. Em relação aos desafios pode-se exemplificar: preocupações sobre segurança da navegação;

mudanças climáticas; o perigo oferecido para a vida oceânica; e a limpeza de plataformas, caso usadas; necessidade de desenvolvimento tecnológico em larga escala.

Embora existam desenvolvedores de tecnologia trabalhando em conceitos dos EUA, Japão, Itália e Espanha, eles são menos numerosos em relação aos que desenvolvem conceitos de turbinas de corrente de maré (LEWIS *et al.*, 2011).

2.2.1.5. *Gradiente de temperatura (OTEC)*

A partir do diferencial de temperatura os sistemas de conversão de energia térmica oceânica (OTEC, sigla em inglês) usam o ciclo de *Rankine* - que é um processo de conversão de energia térmica de baixa e média temperatura em eletricidade (CARLÃO, 2010; IEA, 2018) para alimentar uma turbina para produzir eletricidade.

Dentre suas principais vantagens, destaca-se sua produção de energia em tempo integral. Por outro lado, entre seus principais desafios está seu alto custo; a necessidade de muita energia para bombear a água fria do mar profunda para a superfície; a construção e presença de tubos, bem como planta de instalação, podem prejudicar a vida marinha; a diferença de temperatura está presente apenas na água tropical (VON JOUANNE *et al.*, 2017).

A OTEC existe atualmente em pequenos projetos de desenvolvimento, como em Curaçao e Bora Bora (Polinésia Francesa). Além desses projetos, ideias e protótipos também estão sendo explorados para plantas em outros países, como China, França, Malásia, Omã, Filipinas, Coreia do Sul, EUA (Havaí, Guam, Porto Rico) e Zanzibar (IRENA, 2014c). Além disso, outros locais estão sendo explorados em algumas partes da costa africana para iniciativas posteriores (ADESANYA *et al.*, 2020). No Brasil, apesar de não haver uso comercial, há grandes gradientes verticais de temperatura adjacentes às grandes cidades, caracterizando a região Nordeste como um dos locais mais promissores para a OTEC no Atlântico Tropical (NETO *et al.*, 2014).

2.2.1.6. *Gradiente de salinidade*

Utilizando a força osmótica na foz dos rios, onde a água doce se mistura com a água salgada, a energia associada ao gradiente de salinidade pode ser aproveitada usando o

processo de osmose reversa retardada por pressão⁵ e tecnologias de conversão associadas (IEA, 2019). Dentre suas principais vantagens, cabe mencionar o número crescente de empresas está entrando no mercado para produzir essas membranas dedicadas e outras partes das instalações, por exemplo, pilhas ou módulos.

Por outro lado, dentre os principais desafios, estão o alto custo de membrana, que representa de 50% a 80% dos custos totais de capital; melhorias na densidade de potência; durabilidade; e propriedades de pressão são desejáveis.

Dentre todas as tecnologias mencionadas, é a que de menor grau de desenvolvimento, possuindo ainda diversos desafios que são estudados em projetos-piloto na Noruega e na Holanda, bem como em projetos de pesquisa na Alemanha, Itália, Canadá, Japão, Singapura, Coreia do Sul e EUA. As aplicações focadas na recuperação de energia de salmoura, da dessalinização e fluxos de águas residuais altamente salinas parecem ter maior viabilidade comercial para qualquer aplicação sofisticada (IRENA, 2014d).

⁵ é um processo intermediário entre a osmose direta e reversa, que permite aproveitar o potencial osmótico das soluções para a produção de energia (SILVA, 2009).

Tabela 2.1: Comparação entre diferentes modos de geração da energia do/no mar

| Modo de Geração da Energia | Vantagens | Desafios | Casos Internacionais | Brasil |
|-----------------------------------|--|---|---|--|
| Barragem de marés | <ul style="list-style-type: none"> - há tecnologias desenvolvidas para captação de energia de maré baixa, inferiores a 2 metros (m). - são relativamente previsíveis, com periodicidade diária, quinzenal, semestral e até ciclos anuais ao longo de um período mais longo. - o alcance das marés é pouco influenciado pela condições do tempo. | <ul style="list-style-type: none"> - custos iniciais relativamente altos relacionados aos desenvolvimentos de diques ou aterros e as implicações ecológicas de recintos ou represamentos. - os altos custos de instalação das soluções. | La Rance (França), Sihwa Lake (Coreia do Sul), em menor escala a Usina Annápolis Royal (Escócia); entre outras em países como China e Rússia. | Bacanga (Maranhão) e Maracanã (Pará). |
| Ondas | <ul style="list-style-type: none"> - riscos mínimos ao meio ambiente. - grande volume de água do mar para geração de energia. | <ul style="list-style-type: none"> - custos de instalação dos equipamentos. - as instalações devem ser fortes e sólidas o suficiente para resistirem às tempestades, ao mesmo tempo em que devem ser sensíveis o bastante para captação da energia das marés. | EUA, Reino Unido, Brasil, Austrália e Dinamarca. | Ilha Rasa (Rio de Janeiro) e Porto do Pecém (Ceará). |
| Corrente de marés | <ul style="list-style-type: none"> - turbinas eólicas de eixo horizontal podem fornecer às turbinas de corrente vantagem para seu desenvolvimento, uma vez que os princípios operacionais são semelhantes; o sistema é efetivo em baixa velocidade de rotação dos geradores). | <ul style="list-style-type: none"> - os custos de instalação e descomissionamento e minimizar os requisitos de subestrutura. | Europa, Coreia, Canadá, Japão, China, Nova Zelândia e América do Sul. | - |
| Corrente de oceano | <ul style="list-style-type: none"> - operam de maneira mais contínua do que corrente de maré. - operação abaixo do calado dos navios comerciais. | <ul style="list-style-type: none"> - preocupações sobre segurança da navegação; mudanças climáticas. - o perigo oferecido para a vida oceânica. - necessidade de desenvolvimento tecnológico em larga escala. | Há estudos baseados em desenvolvimentos dos EUA, Japão, Itália e Espanha. | - |

| | | | | |
|--|--|---|---|---------------------|
| | | | | |
| Gradiente de temperatura (OTEC) | <ul style="list-style-type: none"> - energia renovável e ecológica. - produção de energia em tempo integral. | <ul style="list-style-type: none"> - alto custo; é necessária muita energia para bombear a água fria do mar profunda para a superfície. - a construção e a presença de tubos e a planta de instalação podem atrapalhar a vida marinha e. - a diferença de temperatura está presente apenas na água tropical. | Há projetos em Curaçao (Caribe) e Bora Bora (Polinésia Francesa). Além desses projetos, ideias e protótipos em outros lugares, por exemplo, na China, França, Malásia, Omã, Filipinas, Coreia do Sul, EUA (Havaí, Guam, Porto Rico) e Zanzibar. | - |
| Gradiente de salinidade | <ul style="list-style-type: none"> - número crescente de empresas que entram no mercado para produzir essas membranas dedicadas e outras partes das instalações, por exemplo, pilhas ou módulos. | <ul style="list-style-type: none"> - custos de membrana, que representam por 50% a 80% dos custos totais de capital. - melhorias na densidade de potência; durabilidade e; propriedades de pressão são desejáveis. | Há projetos-piloto na Noruega e na Holanda, bem como em projetos de pesquisa na Alemanha, Itália, Canadá, Japão, Cingapura, Coreia do Sul e EUA. | - |
| Solar Offshore | <ul style="list-style-type: none"> - há utilização comercial em alguns países. - aproveitamento de tecnologia já desenvolvida <i>onshore</i>. - facilidade de deslocamento das placas na superfície <i>offshore</i>. - maior disponibilidade de espaço no ambiente marítimo. | <ul style="list-style-type: none"> - dependência de sol (intermitente). - alto custo de implementação. - baixo aproveitamento potencial das placas solares. | <ul style="list-style-type: none"> - Os maiores projetos estão em Aichi, (Japão) e Califórnia (Estados Unidos). - Há projetos de médio/grande porte no Japão, na Coreia e no Estados Unidos, o mercado solar flutuante se espalhou para a China (agora o maior participante), Austrália, Canadá, França, Índia, Indonésia, Israel e Vietnã. | Sobradinho (Bahia). |

Fonte: Elaboração própria com base em Chesf, 2019; Lewis *et al.*, 2011; IRENA, 2014a; IRENA, 2014b; IRENA, 2014c; IRENA, 2014d; Shadman *et al.*, 2019; World Bank Group *et al.*, 2018.

2.2.2.1. Solar Offshore

O layout geral de um sistema fotovoltaico flutuante é semelhante ao de um sistema fotovoltaico terrestre, além do fato de que os painéis fotovoltaicos e, muitas vezes, os inversores serem montados em uma plataforma flutuante (WORLD BANK GROUP et al., 2018). Dentre as suas principais vantagens são: a utilização comercial em alguns países; aproveitamento de tecnologia já desenvolvida onshore, facilidade de deslocamento; maior disponibilidade de espaço no ambiente marítimo. Entretanto os seus principais desafios são: dependência de sol (intermitente); alto custo de implementação; baixo aproveitamento potencial das placas solares.

O primeiro sistema fotovoltaico flutuante foi construído em 2007 em Aichi, Japão, a instalação comercial inicial foi de 175 kWp em sistema construído na Vinícola Far Niente na Califórnia no ano de 2008. As instalações de médio a grande porte (maiores que 1 MWp) surgiram em 2013 após uma onda inicial de implantação concentrada no Japão, na Coreia e no Estados Unidos, o mercado solar flutuante se espalhou para a China (agora o maior participante), Austrália, Canadá, França, Índia, Indonésia, Israel e Vietnã (WORLD BANK GROUP et al., 2018). O Brasil teve em 2019 a instalação de sua primeira usina solar flutuante localizada na cidade de Sobradinho, no Estado da Bahia, com capacidade de 1MWp (CHESF, 2019). Acredita-se que o futuro da energia solar está na água, havendo maior abrangência de mercado através de novos conceitos que podem reduzir significativamente os seus custos (CAZZANIGA et al., 2018).

A tecnologia de exploração energética relacionada ao mar em maior grau de avanço de estágio comercial é a energia eólica *offshore*, razão pela qual terá maior destaque e foco nesse relatório devido à sua maturidade no mercado de energia. Ademais, as características da energia eólica *offshore* permitem que ela contribua para a adequação do sistema de uma maneira particular dentre as demais renováveis variáveis (IEA, 2019) – conforme será visto na Seção a seguir.

2.3. Energia Eólica *Offshore*

Há aumento de investimentos e tendências para o futuro da geração de energia no ambiente marítimo nos últimos anos, com destaque para energia eólica *offshore* tanto em potenciais de geração, quanto em custo-benefício aos países que a adotaram (IEA, 2019), conforme será visto posteriormente. Dessa forma, o foco dessa pesquisa se dará justamente nessa fonte energética, seja pelo seu potencial global ao se comparar com outros modos de captação de energia, seja pela já presente relevância no mercado mundial e brasileiro. Sendo assim, as tecnologias de exploração de energia do/no mar não possuem poucas aplicações de projetos e exploração em energia no litoral (inclusive brasileiro), seja em: Mar Territorial, até 12 milhas náuticas de distância da costa; Zona Contígua, até 24 milhas náuticas de distância da costa; ou Zona Econômica Exclusiva (ZEE), até 200 milhas náuticas de distância da costa (ZANELLA, 2017).

Os sistemas eólicos *offshore* funcionam de maneira semelhante aos *onshore* tendo suas estruturas adaptadas ao meio marítimo (BARBOSA, 2018). Verifica-se que o setor eólico *offshore* adotou padrões relacionados à estrutura superior (torre, rotor e nacelle)⁶, outros foram importados do setor de petróleo e gás (P&G) *offshore* aplicáveis aos elementos de suporte (torre, subestrutura e fundação ou casco flutuante, amarração, âncoras e pilares)⁷. Dessa maneira, o funcionamento de sistema eólico *offshore*⁸ é, na prática, uma compilação entre práticas de diferentes origens que possuem fundamentos técnicos utilizados até os dias atuais (IRENA, 2018). Os elementos e o funcionamento de um sistema eólico *offshore* mencionados são apresentados e devidamente explicados nos **Anexos I e II**. Outro fator relevante são os elementos estruturais que deverão ser utilizados no planejamento, podendo ser classificados em fixos e flutuantes: (a) monopilar; (b) tripé; (c) gravidade; (d) jaqueta; (e) *spar*; (f) semi-submersível; (g) *TLP (tension leg platform)*. As quatro estruturas iniciais são fixas e as demais flutuantes. Igualmente, os elementos estruturais são melhor apresentados e detalhados.

6 Ver anexo I.

7 Idem.

8 Ver anexo II.

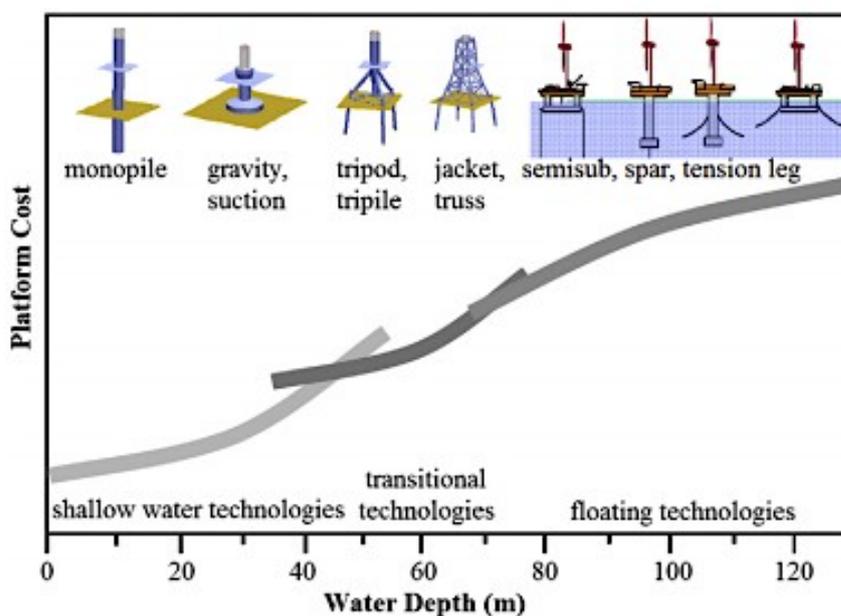


Figura 2.2: Comparação de custo relativo de tecnologias de fundação *offshore*

Fonte: TJIU *et al.*, 2015.

A **Figura 2.2** evidencia a relação direta entre o custo dos diferentes tipos de tecnologias de fundação e profundidade de instalação, podendo ser um critério diferencial de escolha caso a faixa de lâmina d'água atenda a duas tecnologias simultaneamente, diminuindo significativamente os custos de projeto eólico. É importante notar que a utilização de cada item dependerá das características de projeto como distância da costa, profundidade, materiais da superfície local e dependendo do caso, estratégias de descomissionamento requeridas (TOPHAM; MACMILLAN, 2017).

A primeira instalação eólica *offshore* se deu em 1990 (na Suécia) e favoreceu a criação das primeiras instalações comerciais e padrões internacionais do setor, sendo, alguns anos depois, elaborados por países europeus (WIND EUROPE, 2018). Entretanto, há desafios a serem superados para melhor aproveitamento econômico e sustentável das usinas eólicas *offshore*, uma vez que nem todas as elas são bem receptivas à inovação por desconhecer a tecnologia, pois, através de algumas experiências anteriores, comprova-se que a oposição pública pode resultar em atrasos ou paralisação de projetos de energia renovável (POUDINEH *et al.*, 2017).

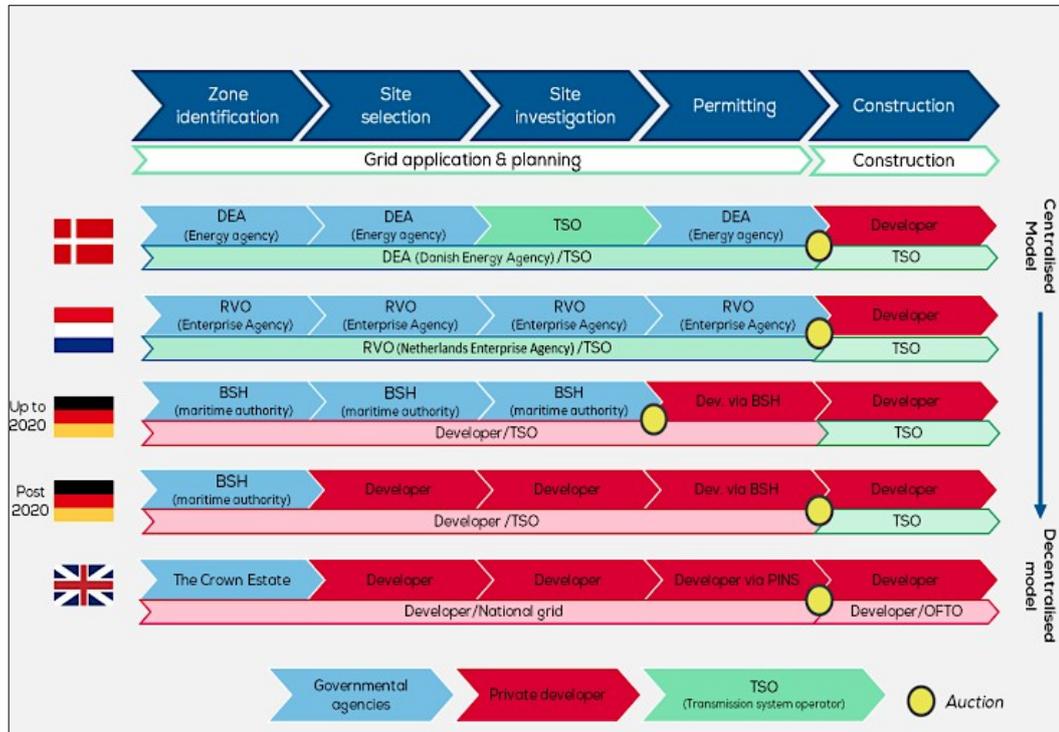
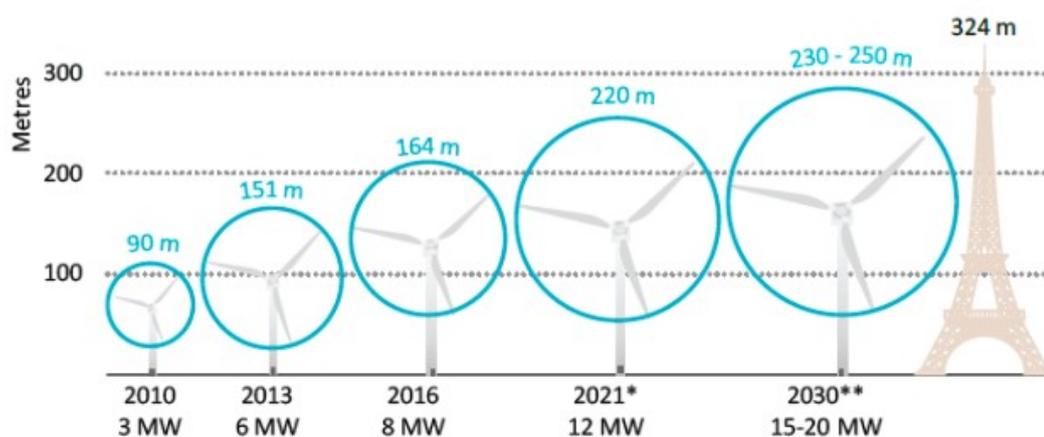


Figura 2.3: Diferentes modelos para desenvolvimento e construção de usinas eólicas *offshore*.
Fonte: YSTAD, 2019.

O Estado deve implementar arcabouços compostos por marco regulatório, políticas de fomento, estudos de impactos e viabilidade técnica, ambiental, sociais, entre outros respaldos necessários para a efetivação das instalações de fazendas eólicas *offshore* e que podem ser aproveitados de outros mercados como P&G, a exemplo de países europeus (POUDINEH *et al.*, 2017). Nesse sentido, há evolução constante das inovações que tomaram as instalações e turbinas eólicas, principalmente no ambiente de projetos *offshore* desde quase duas décadas, atingindo alturas próximas a 220 metros e que de acordo com as perspectivas para 2030 atingirão entre 230 e 250 metros – vale destacar que a Torre *Eiffel* (Paris, França) possui 324 metros, conforme a **Figura 2.4**.

Figura 2.4: Evolução das turbinas eólicas e marcos dos projetos *offshore*

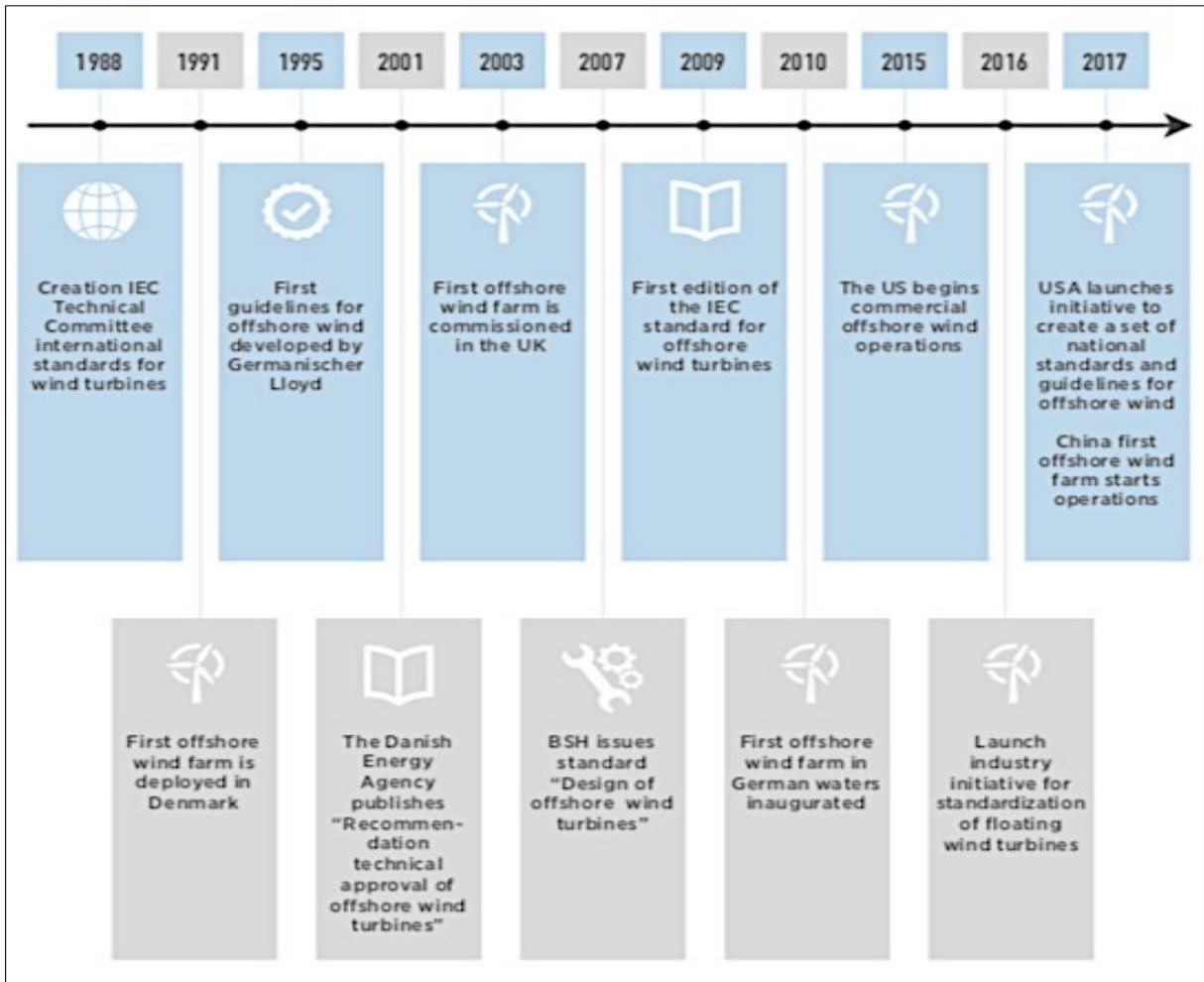


Fonte: IEA, 2019.

No tocante ao avanço deste mercado (**Figura 2.5**), pode-se destacar como surgiram as padronizações de turbinas, a primeira delas foi criada em 1988, pelo Comitê Técnico Internacional da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC, sigla em inglês). Entre as nações que atenderam percentuais de suas demandas energéticas, encontram-se Reino Unido, Alemanha, Holanda, Bélgica, China e Dinamarca (IEA, 2019).

Ao se considerar como ponto de partida para o projeto piloto de *Videnby*, na Dinamarca (1991), notou-se a necessidade de melhoria dos processos de efetivação das usinas eólicas *offshore* (WIND EUROPE, 2018). As principais vantagens da criação de padronizações para o setor são: economia de custos devido a procedimentos de trabalho otimizados; maior influência e participação de vários *stakeholders* interessados; maior confiança do cliente na qualidade do produto; e melhor acesso ao mercado através da remoção de barreiras desnecessárias ao comércio (IRENA, 2018). Apesar de tal desenvolvimento, deve-se enfatizar as melhorias de conhecimento ainda necessárias a serem adquiridas no setor *offshore*: recursos eólicos, impacto ambiental, projeto de fundação, otimização da conexão elétrica, geradores de turbinas eólicas, fases de construção e operação, entre outros (ESTEBAN *et al.*, 2011).

Figura 2.5: Linha do tempo com principais marcos do setor eólico *offshore* a nível global



Fonte: IRENA, 2018.

Verifica-se, portanto, que o setor eólico *offshore* é ainda relativamente imaturo, mesmo em escala global, e isso se reflete em seu alto custo de energia em comparação com outras tecnologias de geração (energia eólica *onshore*, por exemplo) e em sua forte confiança no apoio do governo. Há uma oportunidade significativa de redução de custos no segmento de tecnologia de energia eólica *offshore*, através de inovação no projeto e fabricação de turbinas, estruturas de fundação e equipamentos elétricos, além de melhorias na execução das atividades dispendiosas de transporte, instalação e O&M (IRENA, 2018). Portanto, objetivando identificar as perspectivas para o desenvolvimento dessa indústria no Brasil, a próxima seção do relatório irá analisar em detalhes o panorama global da energia eólica *offshore* (Seção 3) e, em seguida, fará uma breve apresentação do setor elétrico brasileiro

(SEB) (Seção 4) para, finalmente, identificar as possibilidades, as barreiras e sugerir políticas públicas para o caso brasileiro.

3. PANORAMA GLOBAL DA ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE*

A indústria eólica *offshore* está amadurecendo à medida que passa de uma fase pioneira de produção industrial em larga escala; em meados de 2019, havia mais de 5.500 turbinas *offshore* instaladas em 17 diferentes países (IEA, 2019). Nesta seção, serão brevemente descritos e analisados os princípios e as experiências de mercado em energia eólica *offshore* do Reino Unido, Alemanha, Holanda, Bélgica e China (IRENA, 2020). Atualmente, a energia eólica *offshore* está em estágio avançado na Europa devido ao *drive* segurança energética, portanto esta seção se concentra predominantemente em países europeus, sendo complementado pelo caso chinês – onde projetos começam a ser desenvolvidos em elevados níveis de investimentos nos últimos anos, se comparados com a média global (CASTRO *et al.*, 2018; DÍAZ; SOARES, 2020). Dessa maneira, Europa e China lideram o mercado de energia eólica *offshore* com previsão acima de 70% até 2040 da capacidade instalada, enquanto haverá expansão significativa nos Estados Unidos, Coreia, Índia e Japão, que entre eles capturam cerca de um quarto do mercado global (IRENA, 2018; IEA, 2019).

Assim, a história e os cenários previstos sugerem que o sucesso visto na Europa criou expectativas ao redor do globo e a países em que o vento *offshore* pode gerar algumas vantagens, como: valor econômico, social e entregar um baixo custo de energia para energia sustentável e economias verdes (IEA, 2019). Ademais, a contínua redução no custo da energia eólica *offshore* demonstra os motivos pelos quais a mesma está se tornando tão atraente a nível global (GWEC, 2020; POUDINEH *et al.*, 2017).

Entretanto, conforme já descrito, há diversos desafios importantes que a indústria enfrenta na opinião de diferentes atores envolvidos – desenvolvedores, empreiteiros/fabricantes de equipamentos originais (OEMs), empresas de serviços públicos, órgãos governamentais e instituições financeiras – para além do continente europeu, de países asiáticos e, nos últimos anos, na América, como o exemplo dos Estados Unidos (IEA, 2020; IRENA, 2018; ARSHAD, 2019). Há, dessa forma, princípios regulatórios e diretrizes relevantes, bem como lições aprendidas por cada país mencionado, que podem servir de referência para países em processo em desenvolvimento da tecnologia eólica *offshore*, a exemplo do caso brasileiro (IEA, 2019; TCS, 2019).

O desenvolvimento, a melhoria de critérios e os métodos de projeto para fundações de turbinas eólicas, estruturas de suporte e as próprias turbinas, juntamente com o uso de materiais inovadores em sua fabricação, podem levar a reduções no Custo Nivelado de Energia (LCOE⁹, *Levelised Cost of Energy*, sigla em inglês) e no aumento na vida útil das turbinas eólicas *offshore*, conforme demonstra a prática desta indústria. Outrossim, pode-se exemplificar o benefício no que se refere ao caso europeu que, em vista da produção de petróleo e gás (P&G) no Mar do Norte, em declínio, projetos próximos a esta infraestrutura existente foram fatores fundamentais para que a indústria eólica *offshore* aproveitasse frotas de navios de apoio da indústria petrolífera para instalações de turbinas eólicas e subestruturas (POUDINEH *et al.*, 2017).

As reduções de custos alcançadas para outras indústrias *offshore* (por exemplo, setor de P&G e instalação de cabos *offshore*) podem ser alcançadas a favor da indústria de geração de energia eólica, portanto, por meio de uma abordagem multidisciplinar e integrada (ARSHAD, 2019) - um exemplo é a prática de tal integração em países como Reino Unido e Dinamarca. Os custos diminuíram devido a fatores, como: (i) inovação tecnológica, de instalação e logística; (ii) economias de escala em operação e manutenção (O&M) (por exemplo, turbinas maiores); e (iii) capacidade aprimorada de alturas de cubo mais altas, melhores recursos eólicos de águas mais profundas e diâmetros de rotor maiores (IRENA, 2019).

No tocante às características técnicas dos parques eólicos *offshore*, a tendência mundial é caracterizada pelo aumento da profundidade da água e da distância à costa em função da capacidade eólica instalada (IEA, 2019). Há três principais considerações para esta evolução: (i) alguns países têm regulamentações específicas para vento *offshore* restringindo as zonas espaciais distantes da costa – como o exemplo da Escócia; (ii) os conflitos entre vento *offshore* e outros usos marítimos - por exemplo: pesca, turismo, navegação e P&G; e (iii) áreas mais afastadas da costa têm um maior potencial eólico e são mais atrativas à construção de parques eólicos (BAILEY *et al.*, 2014; HIGGINS; FOLEY, 2014; RUDOLPH, 2014). Sendo assim, vale lembrar que a análise de multicritério se faz importante na escolha

⁹ é a receita necessária (de qualquer fonte) para obter uma taxa de retorno sobre o investimento igual à taxa de desconto (também referida como o custo médio ponderado de capital ou WACC) ao longo da vida do parque eólico (IRENA, 2018).

de áreas a serem projetadas para novos parques eólicos *offshore*, englobando os casos anteriormente descritos.

Dessa maneira, a construção de um setor eólico *offshore* exige também a implementação de políticas, planejamento marítimo, apoio financeiro e esforços adequados, ao definir metas claras e posicionar a energia eólica *offshore* como parte das políticas econômicas e energéticas integrais – sejam locais/regionais. A partir de então, o governo enviará um sinal à indústria de que tem um compromisso real com este setor (POUDINEH *et al.*, 2017). Vale lembrar que políticas podem ser implementadas junto a mecanismos de apoio, como o corte de impostos para renováveis, o mercado de crédito de carbono, as taxas de carbono, os sistemas de preços, por exemplo: tarifas *feed-in*; e os sistemas de quotas, como: leilões de renováveis (CASTRO *et al.*, 2018). Pela primeira vez em 2010, a capacidade global de energia eólica *offshore* ultrapassou 1 Gigawatt (GW), atingindo em 2018 um total de 4,3 GW de nova capacidade eólica *offshore* concluído; de 3 GW de energia eólica *offshore* em operação em 2010, a capacidade instalada aumentou para 23 GW em 2018; a implantação anual aumentou quase 30% ao ano, maior do que qualquer outra fonte de eletricidade, exceto energia solar fotovoltaica (PV) (IEA, 2019).

Outro ponto fundamental a se realizar avaliação e comparação nos custos para uma determinada usina utilizado de maneira geral é o custo nivelado de energia (LCOE), composto por quatro principais insumos: (i) custo de capital instalado (CAPEX); (ii) custo operacional anual (OPEX); (iii) produção anual de energia e taxa de cobrança fixa (coeficiente que expressa o custo do financiamento ao longo do tempo); e (iv) vida operacional da planta, pode ser dado conforme equação descrita (BOSCH *et al.*, 2019; IRENA, 2018):

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + O \& M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

I_t = Investimento ao ano t (\$/kW/ano)
 $O \& M_t$ = Operação e Manutenção (\$/kW/ano)
 F_t = Custo de Combustível (\$/kW/ano)
 E_t = Output de Eletricidade (kWh/kW/ano)
 r = taxa de desconto
 t = vida útil do projeto em anos

Portanto, esta seção se divide em cinco subseções, demonstrando os maiores países produtores desta modalidade de geração em cada uma destas (**Tabela 3.1**), dentre as quais Reino Unido lidera o *ranking* em capacidade instalada acumulada, com 10,43 GW (descrito na seção 3.1); seguido pela Alemanha, com 7,69 GW (seção 3.2); a China ocupa o terceiro

lugar com 6,80 GW (seção 3.3); a Holanda ocupa o quarto lugar atingindo 2,61 GW (seção 3.4); e a Bélgica, o quinto lugar com 2,26 GW (seção 3.5) (GWEC, 2020).

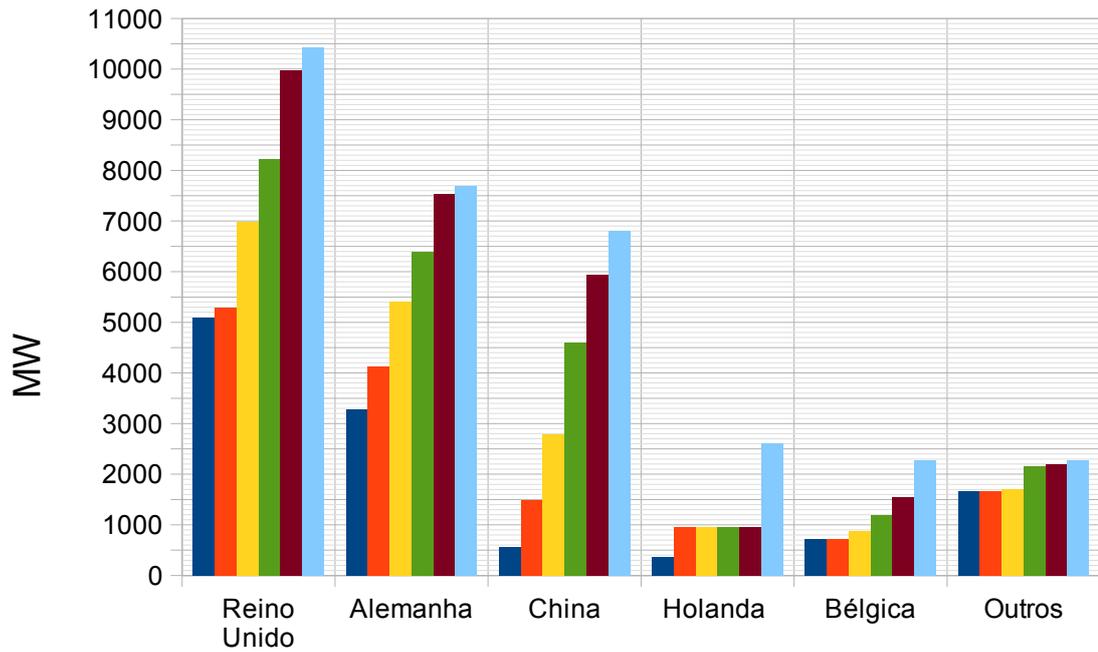
Tabela 3.1: *Ranking* global de capacidade instalada de energia eólica *offshore* (2020)

| Posição no Ranking | País | Capacidade Instalada (GW) |
|--------------------|-------------|---------------------------|
| 1° | Reino Unido | 10,43 |
| 2° | Alemanha | 7,69 |
| 3° | China | 6,80 |
| 4° | Holanda | 2,61 |
| 5° | Bélgica | 2,26 |
| 6° | Dinamarca | 1,70 |
| 7° | Suécia | 0,19 |

Fonte: Elaboração própria adaptada (GWEC, 2021).

O **Gráfico 3.1** demonstra entre 2015 e 2020 a evolução da capacidade eólica *offshore* dos cinco países mais avançados e analisados neste relatório. Vale lembrar que a partir de 2020, houve impacto da pandemia do novo coronavírus (Covid-19), inclusive na implantação *offshore* em curto prazo limitado, uma vez que projetos *offshore* têm períodos de construção mais longos do que projetos *onshore*. Dessa maneira, a maioria dos projetos planejados a serem comissionados em 2020/2021 estão parcialmente comissionados, principalmente na Europa, que é o maior mercado *offshore*. Entretanto, a crise da Covid-19 pode impactar a implantação da energia eólica *offshore* a médio e longo prazos, já que alguns trabalhos de pré-desenvolvimento, como licenciamento e aprovação ambiental, estão sendo adiados (IEA, 2020).

Gráfico 3.1: Evolução da capacidade eólica *offshore* instalada entre 2015 e 2020.



Legenda:



Fonte: Elaboração própria adaptada de GWEC, 2021

3.1. Reino Unido

De acordo com dados do Escritório de Estatísticas Nacionais, em inglês - *Office for National Statistics* (2019), o Reino Unido possui uma superfície de 241.930 km² e uma população de 66.79 milhões de pessoas, sendo este conglomerado composto por: Inglaterra, Escócia, País de Gales e Irlanda do Norte. O Relatório do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), da Organização das Nações Unidas (ONU), destaca o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH)¹⁰ do Reino Unido (ano base 2019) com o valor de 0,932, na 13^a posição entre 189 países analisados (PNUD, 2020). Dessa maneira, este conglomerado se destaca por possuir tanto indicadores econômicos de desenvolvimento (PIB real/per capita)¹¹ quanto indicador humano muito elevados – se comparados com a maioria dos países analisados no relatório do PNUD.

O Reino Unido é atualmente o maior mercado eólico *offshore* do mundo, correspondendo a 10,43 GW (TCE, 2021; GWEC, 2020; IEA, 2019), operando no ano 2000 a Usina de Blyth (4MW) como projeto pioneiro de energia eólica *offshore* do país (DÍAZ; GUEDES SOARES, 2020), iniciando o seu progresso com esta tecnologia (através deste projeto). Dessa maneira, o governo do Reino Unido estabeleceu como meta para a indústria de energia eólica *offshore* atingir 40 GW até 2030, ou seja, uma quase quadruplicação da capacidade eólica *offshore* ao longo desta década; a indústria demonstra que está confiante de que pode ser alcançada, uma vez que o atual oleoduto eólico *offshore* total já se estende a mais de 41 GW (GWEC, 2021). O governo do Reino Unido adotou uma série de apoios diferentes políticas ao longo do tempo, dentre as quais pode-se destacar as Obrigações de Combustíveis Não-Fósseis (sigla em inglês, NFFO - *Non Fossil Fuel Obligation*), que começaram em 1990 e incentivaram o desenvolvimento de energias renováveis em pequena escala até 2019 (OFGEM, 2021).

Em 2002, foi implementada uma política de obrigação renovável neutro (RO - *Renewables Obligation* - cujo nome alternativo é TGC - Certificado Verde Negociável) na

10 é uma medida resumida do progresso a longo prazo em três dimensões básicas do desenvolvimento humano: renda, educação e saúde - criada em 1990 por Mahbub ul Haq, economista paquistanês, em colaboração com Amartya Sen, economista indiano e ganhador do prêmio Nobel de economia de 1998 (PNUD, 2010).

11 US\$42,330 – ano base 2019 (BM, 2019).

Inglaterra, Escócia e País de Gales (e, em 2005, na Irlanda do Norte) como primeiro mecanismo em prol da meta de 10% da sua energia gerada a partir de fontes renováveis até 2010 (desenvolvendo *à posteriori* outras políticas para promoção de energias renováveis/redução da emissão de GEE) (IEA, 2021). O país teve a sua primeira usina eólica *offshore* (*North Hoyle*) comissionada no ano de 2003 (conforme **Figura 2.5**), com 60 MW, 12 metros de profundidade (valor aquém das suas médias atuais) e localizado a 18 quilômetros da costa britânica (IRENA, 2018; IRENA, 2018).

Vale lembrar que o governo britânico reconheceu desde o início que a fonte eólica *onshore* não seria suficiente para alcançar os objetivos da política energética e que a tecnologia eólica *offshore*, maremotriz e energia das ondas seriam imprescindíveis para o alcance das metas em grande escala. Logo, patrocinou, por meio de financiamentos não reembolsáveis, o movimento inicial do mercado eólico *offshore* (VITERBO, 2008). Em 2009, o governo adotou uma abordagem em que um multiplicador foi aplicado a ROCs dependendo da faixa em que a tecnologia renovável é colocada, como, por exemplo: energia eólica *offshore* (junto a biogás, geotérmica, fotovoltaica e oceânica), era aplicado um multiplicador de 2 ROC/MWh no intuito de fortalecer o incentivo ao investimento em tecnologias de custo (ou seja, menos estabelecidas) (POUDINEH *et al.*, 2017).

A perspectiva positiva foi reforçada por uma queda nos custos estimulada por leilões usando Contratos por Diferença (*CfD*, sigla em inglês), uma vez que os mesmos são um contrato de longo prazo que paga ao gerador de eletricidade renovável a diferença entre o preço de mercado da eletricidade e um preço de longo prazo (IEA, 2021; HIGGINS; FOLEY, 2013). Dessa maneira, a política governamental do país apoia o desenvolvimento de energias renováveis, principalmente por meio de leilões de contratos de geração de energia limpa, conhecidos como *CfDs*, na colaboração para o desenvolvimento do setor (GWEC, 2021). De igual maneira, a padronização britânica (desde décadas de experiência com petróleo e gás) contribui para aumentar a competitividade de custos e ajudar a garantir progresso na implantação eólica *offshore*; o vento no ambiente *offshore* é “alugado” em rodadas (conforme descrito na próxima subseção) - o que viabiliza projeto organizado planejamento ao longo dos próximos anos (IRENA, 2018).

Outrossim, os preços no país estão caindo significativamente (entre 2015 e 2017 os custos de suporte caíram 50% nos leilões de contratos por diferença). Haverá uma grande expansão da energia eólica *offshore* em todo o mundo com algumas previsões para

crescimento anual de 17% de 22 GW a 154 GW no total de capacidade instalada em 2030: no Reino Unido, o vento *offshore* contribuirá com até 30 GW de capacidade de sua geração. De acordo com o *UK Offshore Sector Deal* (**Figura 3.6**), a construção de até 30 GW em energia eólica *offshore* pode significar gastos de até £ 40 bilhões de infraestrutura na próxima década (GOV UK, 2021). Ademais, vale lembrar que este negócio é construído sobre os alicerces da Estratégia Industrial – ideias, pessoas, infraestrutura, negócios, ambiente e lugares.

A meta do Reino Unido para capacidade eólica *offshore* instalada de aproximadamente 10 GW até 2020 foi atingida; o país possui atualmente mais de 40 parques eólicos instalados e cerca de 2.200 turbinas agora gerando energia nas suas águas – destaca-se que as primeiras turbinas *offshore* foram instaladas no Mar do Norte (conforme mencionado na seção 2) (GWEC, 2020). Apesar de o país ser destaque no setor, há diversas incertezas para os próximos anos com a saída do Reino Unido da União Europeia (UE), que podem impactar na sua capacidade de manter os níveis atuais de geração de eletricidade e pode torná-lo mais vulnerável à escassez de energia no caso de condições climáticas extremas ou interrupções de geração não planejadas (POUDINEH *et al.*, 2017).

Houve um marco comercial do setor eólico *offshore* anunciado em 2019 no país, no qual a indústria e o governo estabeleceram uma série de compromissos conjuntos com o objetivo de maximizar os benefícios industriais e econômicos do setor, como o exemplo da *Offshore Wind Growth Partnership* (OWGP), financiada pela indústria, que está investindo £ 100 milhões na construção de uma forte cadeia de suprimentos no Reino Unido ao longo desta década (GWEC, 2021). Entretanto, podem surgir questões além das fronteiras em relação ao fornecimento de energia, em particular de gás, pois o conglomerado importa seu suprimento de gás, principalmente da Noruega e do Catar (GNL) e produz fornecimento de eletricidade também a partir da queima de gás. Dessa maneira, o acesso ao armazenamento de gás em tempos de crise pode se tornar mais difícil para o Reino Unido, pois a prioridade será dada aos estados membros da UE; a distribuição e a produção de energia nuclear também podem estar sob ameaça do *Brexit*, forçando alternativas a serem consideradas para garantir a segurança da energia no Reino Unido (NORTH SEE, 2021).

Ademais, o primeiro-ministro Boris Johnson pediu uma Revolução Industrial Verde após a pandemia e estabeleceu um Plano de Dez Pontos para alcançá-la, com a energia eólica *offshore* no topo da lista (GOV UK, 2021); isso está de acordo com a política governamental mais ampla; em 2019, o Reino Unido foi o primeiro país a adotar uma meta juridicamente

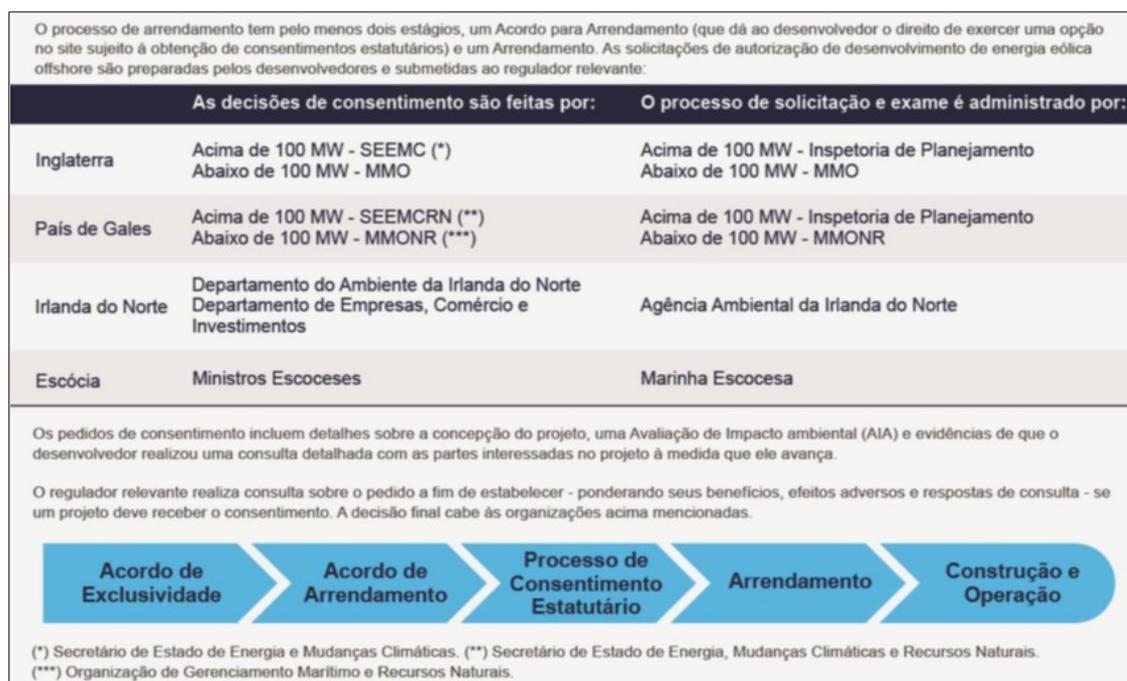
vinculativa de zero emissões líquidas de gases de efeito estufa (GEE) até 2050, em comparação com os níveis de 1990 (GWEC, 2021). No Reino Unido, a energia eólica *offshore* é atualmente a única fonte renovável que tem a escala comercial necessária para fornecer a mesma quantidade de energia que uma usina nuclear dentro dos prazos necessários (NORTH SEE, 2021). Olhando para o futuro, o hidrogênio verde gerado pela energia eólica *offshore* se tornará uma nova fonte de energia significativa ao lado de outras tecnologias inovadoras, desde que a estrutura da política do governo incentive a implantação dessas tecnologias (GWEC, 2021).

3.1.1. Processo de Licitação/Consentimento

A energia eólica *offshore* no Reino Unido tem se realizado (com pequenas exceções) através de rodadas de licitação (ou em inglês, *rounds*), por meio das quais é feita a construção de usinas *offshore* (IRENA, 2018). Dessa maneira, a “*The Crown Estate*” detém os direitos sobre o fundo do mar até 12 milhas náuticas e explorar o fundo do mar para energia renovável até 200 milhas de águas internacionais. Portanto, trata-se de uma instituição fundamental no contexto das concessões de arrendamentos (através de tais rodadas) em abrangências marítimas do Reino Unido (**Figura 3.1.1**) (TCE, 2021).

A trajetória do país neste setor sugere que os arrendamentos foram distribuídos em quatro rodadas de negociações entre o governo e as empresas, são elas: (i) *Round 1*; (ii) *Round 2*; (iii) *Round 3*; e (iv) *Round 4* (RENEWABLE UK, 2018; TCE, 2021). Em 2001, a primeira rodada de negociação (*Round 1*) incluiu 16 *sites*, cada um limitado ao máximo de 30 turbinas e a capacidade típica dos parques eólicos era cerca de 70/100 MW. Houve 18 consórcios apoiados pelo Departamento de Comércio e Indústria do Reino Unido e qualificados a desenvolver projetos de 30 MW cada (TCE, 2021) - o objetivo desta rodada era demonstrar a aplicabilidade comercial da tecnologia, limitando o custo total de suporte de receita; nesse sentido, empreendedores foram convidados a submeter propostas de arrendamento para essas áreas. As melhorias de disponibilidade em velocidades de vento de 7 a 14 m/s foram necessários para cumprir metas econômicas mais ambiciosas a partir desta rodada (FENG *et al.*, 2010).

Figura 3.1.1: O processo de arrendamento no Reino Unido.



Fonte: BARBOSA, 2018.

Durante a rodada 2 (*Round 2*), em 2002, incluíram-se 16 *sites offshore* de até 900 MW, 4,8 GW foram arrendados e os licitantes da rodada 3 anunciados em janeiro de 2010; portanto, os relatórios publicados da primeira rodada forneceram informações valiosas sobre experiências *offshore* para a operação das rodadas posteriores (IRENA, 2018). O processo de licitação da segunda rodada foi dado por *CfD* (contratos iniciais por diferença, não competitivo) dentro de três áreas estratégicas (*Greater Wash*, *Thames Estuary* e Noroeste de *Liverpool Bay*), locais que estavam normalmente mais distantes da costa; foram dimensionados para projetos maiores e capacidades eólicas *offshore* identificadas na avaliação de impacto ambiental com base no relatório do governo “*Future Offshore*” (RENEWABLE UK, 2018; BARCLAY, 2012).

A terceira rodada (2008) realizada por *CfD* (contratos competitivos por diferença) envolveu *sites* maiores e a maioria destes em locais mais distantes da costa em relação aos correspondentes de rodadas anteriores – vale lembrar que o sistema de planejamento espacial (*MaRS*) foi utilizado na Rodada 3 para identificar nove zonas de desenvolvimento para as quais os desenvolvedores puderam concorrer (RENEWABLE UK, 2018). Uma vez premiado, cada uma das nove zonas foram gerenciadas por um único parceiro de desenvolvimento

(empresa ou consórcio) que supervisiona o desenvolvimento da zona (RENEWABLE UK, 2018; TCE, 2021).

Anunciada em 2019, a 4ª Rodada de Locação Eólica *Offshore* (e mais recente) sinaliza um grande voto de confiança na economia verde do Reino Unido e ambições nas águas ao redor da Inglaterra e País de Gales; juntos representam pouco menos de 8 GW de nova capacidade eólica *offshore* em potencial, com a oportunidade de fornecer eletricidade limpa para mais de sete milhões de residências e criar oportunidades de emprego em todo o país (TCE, 2021). A energia fornecida pelos novos projetos eólicos *offshore* na última rodada de leasing do *The Crown Estate* levará adiante os compromissos do país em eliminar a sua contribuição para as emissões de carbono até 2050, criando milhares de novos empregos e garantindo que a Grã-Bretanha volte a ser mais verde (GOV UK, 2021). O processo de consentimento do Reino Unido pode ser demonstrado conforme a **Figura 3.1.2**.

Figura 3.1.2: Síntese do processo de arrendamento no Reino Unido.

| | |
|--|---|
| Princípio Líder para Outorga da Concessão | <ul style="list-style-type: none"> • Projetos são concedidos em rodadas ("rounds") de licitação na modalidade Leilão. |
| Órgão(s) Responsável(is) | <ul style="list-style-type: none"> • <i>Marine Management Organisation</i> (MMO) - é responsável pelos consentimentos para parques eólicos até 100 MW. • Parques acima de 100 MW - requer aprovação do Secretário de Estado de Energia e Mudanças Climáticas. |
| Planejamento Espacial / Seleção de áreas / Alocação do Site | <ul style="list-style-type: none"> • The Crown Estate (TCE) projeta as zonas adequadas para parques eólicos <i>offshore</i>. |
| Encaminhamento da Solicitação do Site | <ul style="list-style-type: none"> • The Crown Estate funciona como um "balcão único". |
| Avaliação de Impacto Ambiental | <ul style="list-style-type: none"> • DECC realiza Avaliação Ambiental Estratégica (AAE); • Desenvolvedores realizam Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) para avaliar impactos específicos do <i>site</i>. |
| Licenças / Permissões / Condições | <p>Permissões da TCE necessárias para parques eólicos <i>offshore</i>:</p> <ul style="list-style-type: none"> • uma opção de arrendamento do local; • um contrato de arrendamento; • Uma Ordem de Consentimento de Desenvolvimento (Marítima) é expedida pela MMO. |

Fonte: BARBOSA, 2018.

3.1.2. Custo de Energia

Nos últimos anos, uma série de projetos de pesquisa financiados pelo Reino Unido buscaram a melhoria da robustez do sistema, o monitoramento das condições de saúde e as metodologias de prognóstico vitalício, para melhorar a disponibilidade geral das turbinas

eólicas (NG, 2016). O custo da nova energia eólica *offshore* caiu 50% desde 2015 e atualmente é uma das opções de menor custo para uma nova energia no Reino Unido - mais barata do que o novo gás e a energia nuclear; entre 2016 e 2021, quase £ 19 bilhões estão sendo investidos em energia eólica *offshore* no Reino Unido (RENEWABLEUK, 2021).

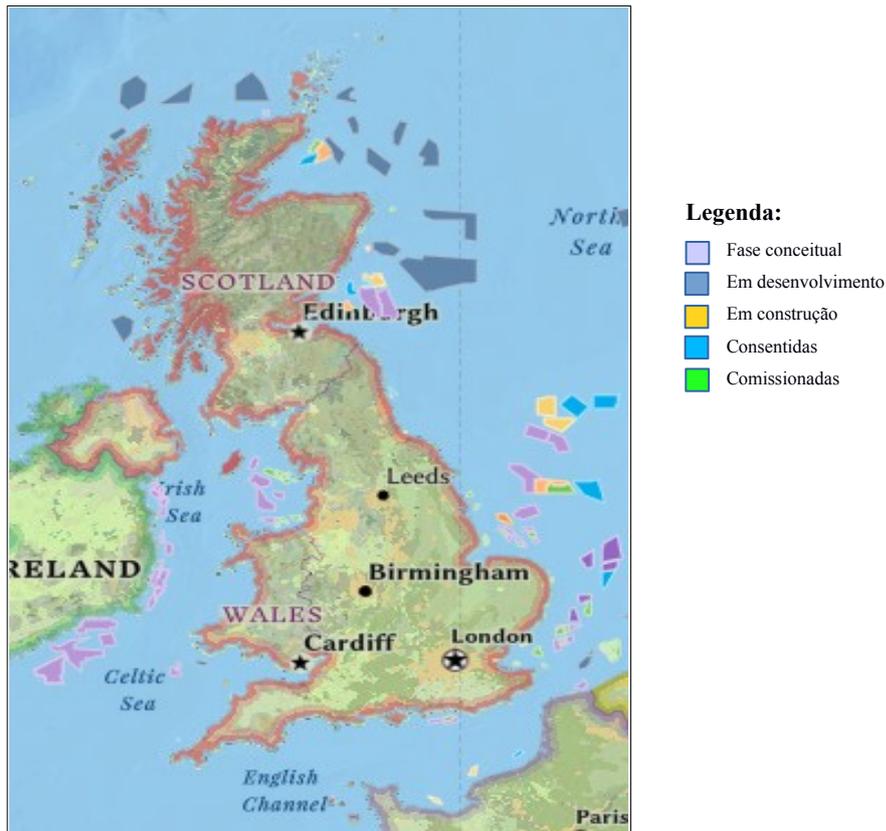
O leilão *CfD* Rodada 2 que começará a gerar em 2021/22 teve seus preços da energia eólica *offshore* de £ 57-74 por MWh. Os preços de exercício no leilão da Rodada 3 foram ainda menores, caindo para £ 39-41 por MWh para parques eólicos *offshore* em andamento e previstos para 2023. No entanto, o preço de exercício mostra apenas o que o gerador recebe; não revela o custo real de produção de eletricidade, em maior grau medido pelo Custo Nivelado de Energia (LCOE), ou a margem de lucro subsequente gerada (a diferença entre o LCOE e o preço de exercício). O custo de geração de eletricidade deve cair em mais de 65% entre 2015 e 2023, de £ 120/MWh para cerca de £ 40/MWh; caso efetivado, isso representa uma redução significativa de custos (TCE, 2021).

A experiência do país revela que os recentes projetos eólicos *offshore* estão em ligeiro declínio para LCOE e que as estimativas de custo de domínio público não são confiáveis. Contudo, o que mais preocupa é que os custos de parques eólicos *offshore* ainda são muito mais elevados do que aqueles implícitos nas recentes ofertas de apoio financeiro do governo do Reino Unido por meio de Contratos para Diferença (*CfDs*). O LCOE para novos parques eólicos ainda é significativamente maior do que o nível do *CfD* recente lances de preço de exercício. Existem alguns sinais encorajadores, no entanto, como o projeto de *West of Duddon Sands* teve um LCOE menor que £ 100/MWh. É claro que a redução contínua de LCOE exigirá a continuação evolução tecnológica, bem como práticas operacionais mais eficientes e taxas de desconto mais baixas para refletir o risco de receita reduzido sob os *CfDs* (POUDINEH *et al.*, 2017).

Os resultados recentes dos leilões da UE indicam reduções de custos de 45 a 50% nos próximos cinco anos devido a vantagens de economia de escala, normalização e agrupamento. Os preços de exercício no leilão *offshore* do Reino Unido definido em setembro de 2019, com comissionamento esperado em 2025, foram de apenas US\$49-52/MWh, o que é uma evidência da rápida maturidade da tecnologia *offshore* nos próximos anos (IEA, 2020). Este investimento apoia milhares de empregos em todo o Reino Unido na fabricação, desenvolvimento de projetos, construção e operações. O setor de energia eólica *offshore* estabeleceu planos ambiciosos para um negócio transformador que irá gerar dezenas de

milhares de empregos qualificados e altamente produtivos em todo o Reino Unido e tornar a energia eólica *offshore* a espinha dorsal de um sistema de energia limpa, confiável e acessível (RENEWABLEUK, 2021; IEA, 2020).

Figura 3.1.3: Mapa de parques eólicos *offshore* do Reino Unido.



Fonte: Adaptado do site 4COffshore.

3.2. Alemanha

A Alemanha possui uma superfície de 357.581 km² e uma população de 83,19 milhões de pessoas, de acordo com dados do Escritório de Federal de Estatísticas, em alemão - *Statistisches Bundesamt* (2020). No tocante ao seu Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) o país (ano base 2019) atingiu o valor de 0,947 no Relatório do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), da Organização das Nações Unidas (ONU), destacado na 6ª posição entre 189 países analisados (PNUD, 2020). Dessa maneira, seus indicadores econômicos de desenvolvimento (PIB real/per capita) e indicador humano alemães são classificados pela ONU como muito elevados.

O país é o segundo maior mercado mundial de energia eólica *offshore* na Europa (e no mundo) com 6,92 GW (GWEC, 2021). O apoio da Alemanha para a produção de energia eólica *offshore* passou por uma transformação significativa nos últimos anos (POUDINEH *et al.*, 2017) – a exemplo do Reino Unido, entretanto, atualmente a Alemanha possui menor capacidade instalada (REN21, 2020; GWEC, 2021). Comparativamente recém-chegado à geração eólica *offshore*, o primeiro parque eólico *offshore* da Alemanha, *Alpha Ventus*, começou a produzir energia em 2009 (WEF, 2019). Pode-se exemplificar ao longo dos anos dois importantes programas que surgiram¹² para produção de energias renováveis/livres de carbono e redução da emissão de GEE alemães: (i) *Energiewende* (Transição Energética, 2011); e (ii) *Renewable Energies Act* (Ato de Energias Renováveis, 2014) (ROGGE; JOHNSTONE, 2017; LAUBER; JACOBSSON, 2016).

A Câmara Alemã aprovou em 2016 alterações a uma série de atos, incluindo o Programa de Geração de Energias Renováveis que estabelece que os projetos de energias renováveis devem ser objeto de leilão e não poderiam mais ser remunerados por meio de preços administrativos; e a Lei Eólica *Offshore* (tradução em alemão - *WindSeeG*) também foi aprovada, especificando o modelo de leilão para energia eólica *offshore* (IRENA, 2018). As três primeiras licitações *onshore* realizadas durante 2017 foram dominadas pelos chamados “projetos eólicos do cidadão”, que foram autorizados a licitar sem autorização e quando bem-

12 os principais exemplos de eventos que motivaram a criação dos programas são: Acordo de Paris (2015); Protocolo de Kyoto (2007); Acidente Nuclear de Fukushima (2011); e plano de desativação das usinas nucleares até 2022, entre outros (ROGGE; JOHNSTONE, 2017; LAUBER; JACOBSSON, 2016).

sucedidos têm até quatro anos e meio para implementação - esta lacuna foi reconhecida pelo governo alemão e o plano de concorrências foi alterado para leilões futuros (GWEC, 2018).

Dessa maneira, em abril de 2017 os resultados do primeiro leilão *offshore* foram considerados como um importante sinal para o mercado *offshore* na Alemanha, superando as expectativas dos analistas: o preço médio adjudicado foi de 0,44 ct de €/kWh e a oferta mais baixa 0 ct de €/kWh - o que significa que concorrências para mais de 1 GW de nova capacidade *offshore* não recebem mais do que o valor atacadista de energia (KREISS *et al.*, 2017). A EnBW (concessionária alemã) e a DONG (empresa dinamarquesa de energia) venceram o leilão para entregar (nos anos 2024/2025) quatro projetos - três dos quais, com capacidade total de 1.38 GW, sem qualquer subsídio. A segunda licitação *offshore* foi concluída em abril de 2018; de acordo com o planejamento energético alemão, em 2030 a Alemanha espera ter entre 15 e 20 GW de capacidade eólica *offshore* (GWEC, 2021; POUDINEH *et al.*, 2017) (**Tabela 3.6**).

Após a fase de transição (propostas de 2017/2018), a emenda à Lei de Energia Eólica *Offshore* entrou em vigor em 2020 para definir novas metas de expansão para a energia eólica *offshore* na Alemanha (BWE, 2021). Atualmente, o país possui quatro grandes *clusters* de projetos eólicos *offshore* diferentes: (i) *BorWin*, (ii) *DolWin*, (iii) *HelWin* ;e (iv) *SylWin*; cada *cluster* está planejado para ter diversas plataformas conversoras que transportarão a energia para a costa via HVdc¹³ (GWEC, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2015). Para atender ao aumento da meta *offshore* para 20 GW até 2030, a Agência Federal Marítima e Hidrográfica Alemã (BSH) fez ajustes ao FEP 2020 (Plano de Desenvolvimento de Área) (*Flächenentwicklungsplan* ou FEP); além disso, o FEP 2020 apresenta outras áreas possíveis para longo prazo desenvolvimento após 2030, o desenvolvimento deve permitir atingir a meta de cerca de 30 GW em 2035 (de acordo com o 2021- estrutura do cenário de 2035) e define duas áreas para possível geração alternativa de energia no mar sem conexão à rede (BWE, 2021).

¹³ HVdc (*High Voltage and direct current*) tradução em inglês para corrente contínua em alta tensão.

3.2.1. Processo de Licitação/Consentimento

O processo regulatório para energia eólica *offshore* é gerenciado pela BSH, que define as áreas a serem licitadas e suas respectivas datas de licitação no FEP e realiza investigação preliminar de maneira multi-criteriosa destas áreas; vale lembrar que apenas nas águas territoriais da Alemanha os estados federais são os órgãos competentes (IRENA, 2014). Nas licitações, a premiação pela construção de um projeto de energia eólica *offshore* em área pré-investigada é concedido ao licitante com o valor de lance mais baixo; caso diversos licitantes apresentarem propostas zeradas para a mesma área, o *WindSeeG* oferece a estes um sorteio, sendo este procedimento suposto a revisão em 2022 (BWE, 2021). É essencial para o planejamento estratégico do setor, portanto, a compreensão do projeto de leilão e suas estruturas subjacentes para que os licitantes possam evitar riscos e explorar oportunidades (KREISS *et al.*, 2017).

Os estados federais exercem menor grau de influência neste setor, já que quase todos os projetos de energia eólica *offshore* na Alemanha estão localizados na ZEE (e distantes da costa alemã) (**Figura 3.2.1**) no Mar do Norte e Mar Báltico (**Figura 3.2.2**) (IRENA, 2014). O processo de aprovação do projeto inclui uma análise para verificar se as instalações/componentes estruturais foram certificados de acordo com o padrão BSH para o projeto de turbinas eólicas *offshore*, emitido pela primeira vez em 2007 (GWEC, 2020). Esta norma consiste em: (i) desenvolvimento; (ii) projeto; (iii) implementação; (iv) operação; e (v) desativação de parques eólicos *offshore* - ademais, regula vários componentes estruturais das fazendas, além de outros padrões BSH para fundações e avaliação de impacto ambiental (IRENA, 2014). Ao aprovar essas cinco fases, a BSH geralmente é apoiada por especialistas externos, por exemplo, um especialista geotécnico para a fase de desenvolvimento ou um especialista em turbinas eólicas para a fase de projeto – vale lembrar que o mercado pode se beneficiar de um processo de aprovação simplificado e mais rápido pela BSH em algumas situações (GWEC, 2020).

Na Alemanha, o procedimento de aprovação e solicitação de novos projetos de tecnologia eólica *offshore* abrange: (i) certificação como um requisito legal (normas/regulamentos BSH se aplicam aqui); e (ii) procedimentos regulatórios para parques eólicos *offshore*, dependendo do local de construção. Para o território costeiro alemão (dentro de 12 milhas náuticas da costa), os processos de admissão e administrativos são de responsabilidade dos estados; no entanto, a maioria das usinas eólicas *offshore* está localizada

na ZEE, que se estende de 12 milhas náuticas até 200 milhas náuticas; para os parques eólicos na ZEE, a BSH emite autorizações e fiscaliza. No tocante ao projeto, seus desenvolvedores/proprietários devem demonstrar um catálogo viável e compatível de padrões e métodos aplicáveis e que as condições do local foram atendidas. Ademais, o projeto deve estar em conformidade com o estado da arte. Os padrões serão determinados para especificar, por exemplo, a estrutura de suporte ou turbina eólica. A vigilância dos processos é necessária durante a fabricação, transporte/instalação, avaliação de acompanhamento e inspeção regular são exigidas durante a operação da planta (BWE, 2021; IRENA, 2014).

3.2.2. *Custo de Energia*

Em 2017, houve o fim do regime de tarifa *feed-in* do país (tarifa fixa a ser paga aos produtores em contratos de longo prazo) e a entrada de *feed-in-premium*, que gerou recorde na geração de energia eólica 6.581 MW; no *FiP* (ou *feed-in-premium*) o prêmio é calculado como a diferença entre o preço de mercado e o preço máximo (GWEC, 2018). O Fórum Econômico Mundial (2019) apontou que custos na geração *offshore* caíram drasticamente nos últimos anos e em 2018 o governo alemão removeu os subsídios para novas energias eólicas *offshore* pelo segundo ano consecutivo.

Valores de mercado mensais para energia eólica *offshore* caíram no início de 2020 devido à pandemia de COVID-19, atingindo um mínimo de 1,1 ct/kWh em abril de 2020. Desde agosto de 2020, o valor de mercado para a eletricidade da energia eólica *offshore* novamente alcançou um nível comparável ao ano anterior; a queda de preços no primeiro semestre do ano é também refletida na média ponderada por volume de 2,7 ct/kWh em 2020 - 21% abaixo do anterior média anual de 3,4 ct/kWh. De acordo com os dados de projeção do operador do sistema de transmissão (TSO), o poder de produção dos projetos de energia eólica *offshore* alemã totalizaram 29,1 TWh em 2020. Especialmente nos meses de janeiro, fevereiro, outubro e novembro de 2020, o *feed-in* foi significativamente maior do que no ano anterior. No geral, 13% a mais de eletricidade foi alimentada na rede a partir da energia eólica *offshore* em 2020 em comparação com a projeção de 2019 (BWE, 2021; IEA, 2020).

Figura 3.2.1: Mapa de parques eólicos *offshore* da Alemanha (Mar do Norte).

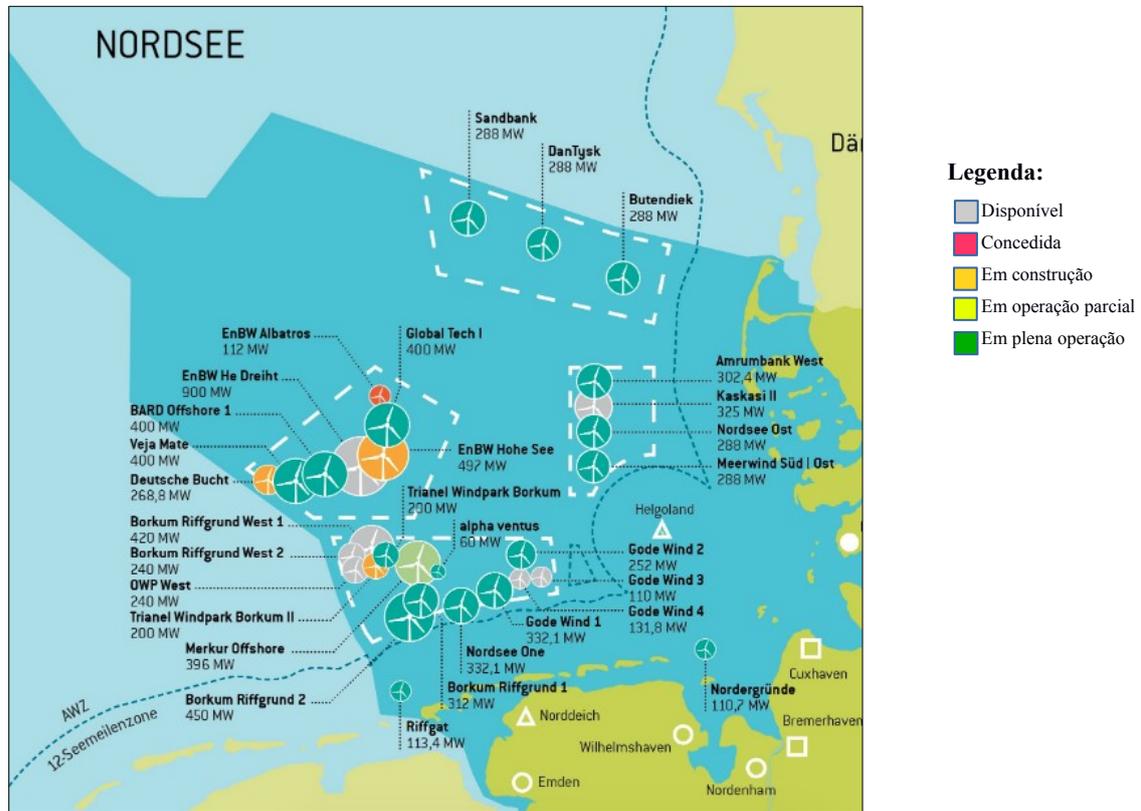


Figura 3.2.2: Mapa de parques eólicos *offshore* da Alemanha (Mar Báltico).



Fonte: Elaboração própria adaptada (site oficial *German Offshore Wind Energy Foundation*).

3.3. China

De acordo com o Escritório Nacional de Estatísticas da China (2021), este país possui uma população de aproximadamente 1.4 bilhões de habitantes e uma superfície de 9,5 milhões de km² (dados de 2020). A República Popular da China possui a segunda maior economia do mundo e seu crescimento econômico recente veio seguido do aumento do consumo de energia (IEA, 2019; BM, 2020). O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) chinês (ano base 2019) atingiu o valor de 0,761, na 85^a posição entre os países analisados no Relatório do Programa das Nações Unidas (PNUD, 2020). Dessa maneira, a China se destaca também por ser o país com a maior população e terceiro maior território do mundo, além de atingir indicadores econômicos de desenvolvimento (PIB real/per capita) elevados.

A indústria de energia eólica chinesa experimentou um rápido desenvolvimento desde a introdução da Lei de Energia Renovável da China, em 2005, que foi uma tentativa de reduzir o consumo de carvão (IRENA, 2014). De fato, parece provável que a China defina o ritmo da transição de uma economia do carvão para um modelo de energia mais limpa e sustentável (IEA, 2020). A evolução da economia chinesa influenciou diretamente em consumo de energia no país, que, de acordo com a Agência Internacional de Energia, cresceu 3,5% (2018), respondendo por um terço do crescimento da demanda global – o país é responsável pelo maior crescimento em energia solar e eólica do que qualquer nação. O desenvolvimento tecnológico chinês também atingiu um alto nível, de tal forma que a maioria das turbinas agora são construídas por fabricantes chineses. Dessa maneira, a China está prestes a se tornar o líder global em energia eólica *offshore*; a taxa na qual o país adiciona nova capacidade *offshore* está planejada para dobrar de dois para quatro gigawatts por ano até 2025 (IRENA, 2018).

A China teve seu projeto piloto em 2007, na Baía de Bohai e iniciou seu projeto pioneiro em escala comercial em 2010 (IRENA 2017); a indústria eólica *offshore* é considerada importante no país devido à crescente demanda por eletricidade, proximidade dos recursos eólicos aos centros de demanda locais e esforços para descarbonizar a geração de energia e melhorar a qualidade do ar; para isso, o governo criou a meta de 30 GW de capacidade instalada até 2030 (POUDINEH *et al.*, 2017). A província de Jiangsu, no leste da

China, lidera a indústria *offshore* do país, em 2017, construiu metade da nova capacidade *offshore* do país (WEF, 2019). Empresas chinesas representam uma parcela crescente do mercado, duas empresas estatais estão entre as dez maiores incorporadoras do setor, com cerca de 7% de participação de mercado em termos de propriedade. O China Longyuan Power Group é classificado como o maior produtor de energia eólica da Ásia e China Three Gorges Corporation (CTG) (anteriormente conhecida por seus projetos hidrelétricos) - é uma das maiores empresas de energia do mundo e está envolvida na indústria eólica *offshore* (IRENA, 2019).

Dessa forma, é importante notar também que o país tem a 19ª maior ZEE¹⁴ do mundo e a indústria *offshore* da China está acelerando (IRENA, 2018) com o total acumulado para 6,8 GW, colocando o país em terceiro lugar globalmente, atrás apenas do Reino Unido e Alemanha e em primeiro lugar no continente asiático (GWEC, 2020). Uma política de preços de energia eólica *offshore* bem-sucedida deve fazer uso total dos recursos de energia eólica *offshore* ao menor custo, ao mesmo tempo que promove uma economia de baixo carbono e indústrias relacionadas (DÍAZ; GUEDES SOARES, 2020). No entanto, em 2016, o mercado *offshore* chinês iniciou o que se acredita ser sua tão esperada decolagem, quando 592 MW de nova capacidade foram instalados e empurrou a capacidade acumulada para 1.627 MW (tornando a China a terceira maior nação produtora de vento *offshore*, depois do Reino Unido e da Alemanha) (POUDINEH *et al.*, 2017).

3.3.1. Processo de Licitação/Consentimento

A gestão das fontes de energia renováveis *offshore* na China é caracterizada pelo envolvimento de vários ministérios e agências, principalmente de acordo com a função e área administrativa. Durante a Primeira Rodada de Licitação para Concessão dos Projetos de Usinas Eólicas *Offshore* na Província de Jiangsu (2010). Neste sentido, se identifica uma falta de coordenação entre a Administração Nacional de Energia (*National Energy Administration*, sigla em inglês), cujo interesse residia na construção de usinas eólicas *offshore* o mais próximo possível da costa para reduzir custos e desafios técnicos e a Administração Oceânica do Estado (*State Ocean Administration*, sigla em inglês), que era a favor da instalação de

14 Zona Econômica Exclusiva.

instalações mais afastadas da costa para proteger outros usuários das águas costeiras. Para isso, NEA e SOA lançaram regulamentos conjuntos no ano de 2010, esclarecendo suas respectivas funções, sendo responsáveis junto às províncias pela regulação (DE CASTRO, 2019; GWEC, 2020; WIND POWER, 2021).

As tendências de desenvolvimento sugerem que a China é um modelo claro de mercado emergente (IRENA, 2019). Vale lembrar que a introdução de um sistema de balcão único no processo de licenciamento e o estabelecimento de *FiTs* mais altos serão determinantes para impulsionar a energia eólica *offshore* a se desenvolver ainda mais na China (DE CASTRO, 2019). O progresso no desenvolvimento de padrões técnicos contribuiu para esse rápido crescimento, os seguintes padrões técnicos foram desenvolvidos para energia eólica *offshore* na China: (i) medição ambiente e condições para energia eólica *offshore*; (ii) projetos de turbinas; (iii) equipamento de geração de energia; e (iv) desenvolvimento de projeto (IRENA, 2018). A política de preços da energia eólica *offshore* chinesa evoluiu da demonstração para a concessão, para a tarifa *feed-in (FiT)* e para o estágio de política de concorrência orientada para o mercado na última década - o princípio por trás dessa evolução de política é primeiro a capacidade, depois o preço e o subsídio (IRENA, 2019). A NEA deveria ser responsável pela seleção das propostas emitidas pelos promotores e concordar com as taxas *FiT*, enquanto a SOA seria responsável pela aprovação do local. O *National Energy Bureau* e a *State Oceanic Administration* classificam os projetos *offshore* como: (i) entre marés (área entre a maré baixa e alta ao longo da linha da costa, com profundidade de água inferior a 10 metros); (ii) perto da costa (máximo de 10 km de distância da linha da costa com profundidade de água entre 10 e 50 metros); e (iii) mar profundo (mais de 10 km de distância da linha de costa e profundidade de água superior a 50 metros) (POUDINEH *et al.*, 2017). A **Figuras 3.3.1** demonstra o processo de arrendamento na China.

Figura 3.3.1: Síntese do processo de arrendamento na China.

| | |
|--|--|
| Princípio(s) Líder(es) para Outorga da Concessão | <p>Processo de Licitação.</p> <ul style="list-style-type: none"> • NEA – Administração de Energia do Estado. • SOA – Administração Oceânica do Estado. • Participação dos governos provinciais. |
| Órgão(s) Responsável(is) | |
| Planejamento Espacial / Seleção de áreas / Alocação do Site | <ul style="list-style-type: none"> • Governo Central elabora o zoneamento de áreas adequadas para parques eólicos <i>offshore</i>. • Participação dos governos provinciais. |
| Encaminhamento da Solicitação do Site | <ul style="list-style-type: none"> • Governo propõe os sites e os órgãos responsáveis analisam. • O candidato/desenvolvedor deve comprovar capacidade técnica e econômica. |
| Avaliação de Impacto Ambiental | <ul style="list-style-type: none"> • Conduzida pelo governo. |
| Licenças / Permissões / Condições | <ul style="list-style-type: none"> • Demonstração do uso da área marítima; • Avaliação de impacto ambiental; • Concessão do direito de usar áreas marítimas. |

Fonte: BARBOSA, 2018.

3.3.2. Custo de Energia

O *FiT Offshore* estabelecido foi de RMB 0,85/kWh para perto da costa e RMB 0,75/kWh para entre marés. Nos últimos anos, o desenvolvimento *offshore* tem se concentrado principalmente no desenvolvimento próximo à costa, onde anteriormente o foco era em projetos entre marés (GWEC, 2018). Ademais, baixar os preços e reduzir os subsídios são as principais prioridades da atual política de preços da indústria de energia eólica *offshore* na China, o preço da energia eólica *offshore* tem se mantido constante nos últimos 5 anos, mais alto do que o dos países europeus, de modo que o subsídio permanece quase a metade do preço (DE CASTRO, 2019).

Embora o CAPEX eólico *offshore* tenha sido reduzido de 40 a 50% na China nesta última década, o atual custo nivelado de eletricidade (LCOE) para o mercado *offshore* chinês ainda está em CNY 0,64/kWh (EUR 0,08/kWh). Isso significa que há uma diferença significativa de preços entre o atual LCOE da energia eólica *offshore* e da eletricidade gerada

a carvão, e sem a tarifa *feed-in* para nivelar o campo de jogo, há grande incerteza para o setor no médio prazo. Além disso, há incerteza quanto à capacidade de cumprimento dos projetos no prazo de 2021 para a tarifa *feed-in*, dadas as atuais interrupções na cadeia de abastecimento causadas pelo novo COVID-19 e problemas pré-existentes na cadeia de abastecimento onde a demanda excedeu o suprimento devido à pressa na instalação colocou intensa pressão sobre a nascente cadeia de fornecimento eólica *offshore* do país (REVO, 2021).

3.4. Holanda

O Site Oficial do Governo Holandês (2021), aponta que o país possui uma população de aproximadamente 17.16 milhões de habitantes e uma superfície de 41.53 km² (dados de 2020). O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) holandês (ano base 2019) atingiu o valor de 0,944, na 8ª posição países analisados no Relatório do Programa das Nações Unidas (PNUD, 2020). A Holanda possui capacidade instalada de 2,61 GW, é o terceiro maior produtor de energia eólica *offshore* na Europa e quarto maior produtor do mundo, além de atingir indicadores econômicos de desenvolvimento (PIB real/per capita) e indicador humano muito elevados (PNUD, 2020).

O governo holandês planeja que 27% de toda a energia usada na Holanda venha de fontes renováveis em 2030; ademais, o país também quer atingir zero emissões de dióxido de carbono (CO₂) do fornecimento de energia até 2050 - a energia eólica *offshore* pode ser uma forma importante de produzir energia renovável e atingir esses objetivos, desempenhando um papel fundamental na transição energética (POUDINEH *et al.*, 2017). O Mar do Norte é um ponto favorável para instalar turbinas eólicas por alguns motivos, entres os quais: (i) suas águas relativamente rasas; (ii) seu clima favorável ao vento; (iii) a proximidade de bons portos e consumidores (industriais) de energia (NL GOV, 2021). A Holanda tem uma meta de 4,45 GW de energia eólica *offshore* a ser implementada até 2023, como parte de sua estratégia de energias renováveis, pelo acordo de energia implementado em 2013 através do qual identificou a necessidade para projetos de parques eólicos adicionais. Para isso, selecionou três principais zonas eólicas *offshore* a desenvolver: (i) *Borssele* de 1,4 GW; (ii) costa de *South Holland* de 1,4 GW; e (iii) costa de *North Holland* de 700 MW, com uma capacidade total de 3,5 GW (**Figura 3.4.2**) (NEA 2015).

3.4.1. Processo de Licitação/Consentimento

A Lei de Energia Eólica *Offshore* da Holanda foi adotada em 2015 - segundo a lei, o governo assume a responsabilidade do projeto eólico *offshore* em relação à localização,

arranjos de planejamento espacial e avaliação ambiental do plantas propostas. Outrossim, a lei estipula que a responsabilidade pela rede *offshore* recai sobre o governo, não sobre o desenvolvedor do projeto (NOONAN *et al.*, 2018). Para desenvolver os locais (ou *sites*), o esquema de apoio holandês é um *FiP* baseado em subsídio e consentimento para construir/operar um parque eólico *offshore* para o desenvolvedor de custo mais baixo a cada zona especificada; o governo holandês fornece um modelo de ‘balcão único’ para essas zonas de arrendamento, licitando locais totalmente autorizados para reduzir os custos iniciais de desenvolvimento (IEA, 2019). Até o momento, o modelo *FiP* tem um grande sucesso em trazer propostas competitivas e reduzir o custo dos subsídios, uma vez que empresas bem-sucedidas com o lance de menor preço que atende a todos os requisitos especificados ganham uma simulação holandesa de produção de energia sustentável de 15 anos concessão de subsídio e licença de 30 anos para construir, operar e desativar o parque eólico em questão.

Dessa maneira, o governo da Holanda assume quase todos os riscos associados ao pré-desenvolvimento funciona e regula todas as condições para a construção dos parques eólicos. Licenças e estudos de local são feitos e disponibilizados publicamente para fornecer às empresas uma compreensão detalhada do projeto que estão licitação em cada rodada de licitações (,NOONAN *et al.* 2018). A licença e subsídio para desenvolver parques eólicos nos locais I e II de *Borssele* foram concedidos, através de um processo competitivo, à *Danish Oil and Natural Gas Energy* (DONG) em 2016 com um preço médio de exercício de €72,7/MWh, excluindo custos de transmissão. Este valor é consideravelmente inferior ao preço máximo, mesmo tendo em consideração que o governo pagou pelos elementos-chave do desenvolvimento do projeto e assumindo o risco de ligação à rede (que se estima adicionar custo modesto de € 14/MWh). O contrato foi concedido por 15 anos, após o qual o desenvolvedor receberá o preço de mercado (POUDINET *et al.*, 2017).

Posteriormente a isso, uma rodada de licitação para os sites III e IV de *Borssele* teve um consórcio das empresas: *Shell, Van Oord, Eneco* e *Diamond Generation Europe* (uma subsidiária integral da *Mitsubishi Corporation*) ganhou uma licitação a um preço de contrato de €54, 5/MWh em 2016, que não só era muito inferior ao limite máximo de € 119,75 / MWh, como também se encontrava entre os preços da energia eólica *offshore* mais baixos do mundo. Estes leilões específicos, além do leilão de subsídio *Kriegers Flak* na Dinamarca (2016), inauguraram uma nova era de eficiência de custos para parques eólicos *offshore* (POUDINET

et al., 2017; GWEC, 2020; IRENA 2018). A **Figura 3.4.1** sintetiza o processo de arrendamento na Holanda.

Figura 3.4.1: Síntese do processo de arrendamento na Holanda.

| | |
|--|--|
| Princípio(s) Líder(es) para Outorga da Concessão | <ul style="list-style-type: none"> • Leilão - vencedores de um processo competitivo recebem um contrato de subsídio de estímulo à produção de energia sustentável. • Leilões também são realizados no regime "sem subsídio". |
| Órgão(s) Responsável(is) | <ul style="list-style-type: none"> • Ministério de Assuntos Econômicos (MAE) • Ministério de Infraestrutura e Meio Ambiente (MIMA) |
| Planejamento Espacial / Seleção de áreas / Alocação do Site | <ul style="list-style-type: none"> • O governo identifica zonas específicas para parques eólicos <i>offshore</i>, mediante planejamento e zoneamento. |
| Encaminhamento da Solicitação do Site | <ul style="list-style-type: none"> • Sistema "balcão único" (<i>one stop shop</i>) - o MTOGA é responsável por conduzir o processo de permissão e licenciamento dos projetos, em cooperação com outros órgão/entidades. |
| Avaliação de Impacto Ambiental | <ul style="list-style-type: none"> • O governo é responsável pela elaboração da AIA. |
| Licenças / Permissões / Condições | <p>A decisão do site deve incluir termos e condições em relação a:</p> <ul style="list-style-type: none"> • direitos e interesses de terceiros em relação ao <i>site</i>; • proteção do meio ambiente; • preservação das áreas Natura 2000 e medidas de compensação nos termos da Lei de Proteção da Natureza; • disposições de isenções sob a Lei da Flora e Fauna; • uso eficiente do local pelo parque eólico; • termo da permissão de vento; • custos incorridos com a preparação da decisão no local, incluindo a realização de investigações relevantes e a segurança necessária ao descomissionamento. |

Fonte: BARBOSA, 2018.

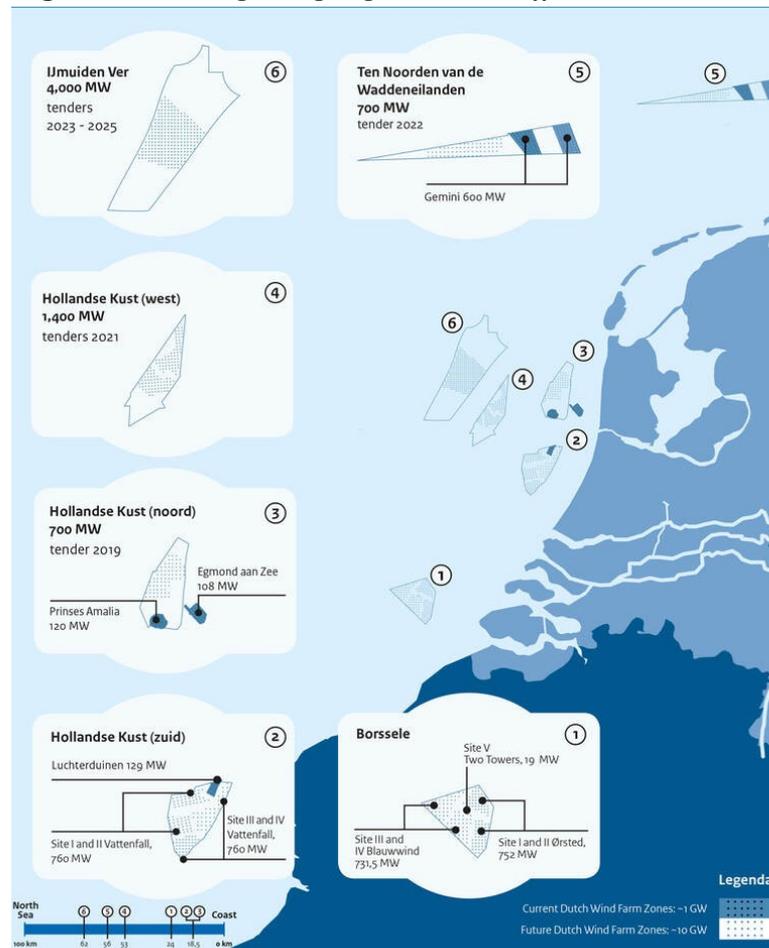
3.4.2. Custo de Energia

Os geradores eólicos *offshore* vendem sua eletricidade no mercado e recebem um prêmio como a diferença entre o preço máximo garantido (preço necessário para cobrir o custo dos geradores) e o preço de mercado corrigido (que é determinado anualmente como o preço médio de mercado da eletricidade corrigido para desequilíbrio e risco de perfil). O preço máximo garantido é determinado através de concurso e tem um limite de forma a garantir a redução dos custos.

A Holanda possui um pequeno benefício de LCOE em ter uma maior capacidade do local. No entanto, as condições representativas do *site* usadas para representar os *sites* sendo comissionados em 2016/2017 são águas mais profundas e mais distantes da costa do que o

local da linha de base, ou seja, vale a pena notar que esta pode não ser uma tendência que continuará, com *sites* recentemente aprovados sendo significativamente mais perto da costa. O site holandês com insumos regulatórios genéricos LCOE é € 153/ MWh (POUDINET et al., 2017; GWEC, 2020; IRENA, 2018). A Holanda é, portanto, um país muito atraente para investir em energia eólica *offshore*, uma vez que os custos de transmissão suportados pelos operadores da rede e pelo regime de consentimento holandês, o que reduz o risco para o desenvolvedor. Esses itens combinados com um menor custo de financiamento e uma menor taxa de imposto trazem o LCOE final para € 102/MWh (\$118/MWh) (NOONAN et al., 2018; IRENA, 2018).

Figura 3.4.3: Mapa de parques eólicos *offshore* da Holanda.



Fonte: Site oficial do Governo da Holanda, 2021.

3.5. Bélgica

A Bélgica possui uma superfície de 30.68 km² e uma população de 11,49 milhões de habitantes, de acordo com dados do Site Oficial do Governo Belga (2020). No tocante ao seu Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) este país (ano base 2019) atingiu o valor de 0,931 no Relatório do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), da Organização das Nações Unidas (ONU), destacado na 14^a posição entre 189 países analisados (PNUD, 2020). Da mesma maneira que os demais países europeus descritos anteriormente, seus indicadores econômicos de desenvolvimento (PIB real/per capita) e indicador humano belgas são classificados pela ONU como muito elevados. Dessa maneira, este país possui 2,26 GW de capacidade instalada de energia eólica *offshore*, é o quarto maior produtor de energia eólica *offshore* no continente europeu e o quinto maior produtor no mundo (WIND EUROPE, 2021; GWEC, 2021).

Em 2009, a Bélgica teve as suas primeiras turbinas eólicas no Mar do Norte instaladas no parque eólico *offshore* *C-Power*. Com dois novos parques eólicos (*Northwester II* e *SeaMade*), oito parques eólicos operacionais no Mar do Norte belga, com uma capacidade total instalada de 2.262 MW (4COFFSHORE, 2021). A primeira área de energia eólica *offshore* no Mar do Norte belga foi construída plenamente dentro dos prazos definidos, vale destacar que os dois últimos parques eólicos *offshore* nesta área foram construídos/comissionados em 2020 (BOP, 2021). O esquema de apoio à geração *offshore* na Bélgica é baseado em um certificado verde comprado pelo operador da rede: o *Elia*; e o valor do certificado é a diferença entre o preço fixo garantido (com base no *LCOE* médio de projetos *offshore*) e o valor corrigido de mercado que torna o modelo de suporte belga uma forma de *FiP* (DE CASTRO *et al.*, 2020; MUMM, 2019). Atualmente, a Bélgica tem quinze projetos de parques eólicos *offshore*, entre os quais doze operam normalmente (**Figura 3.5.3**) (4COFFSHORE, 2021).

3.5.1. *Processo de Licitação/Consentimento*

O plano espacial e marinho belga compreende o Mar Territorial, a Plataforma Continental e a ZEE, conforme estabelecido no Decreto Real de 20 de dezembro de 2000 ou Lei do Mercado de Eletricidade relativo ao estabelecimento de um plano espacial marinho através de princípios, objetivos, uma visão de longo prazo e espacial escolhas de políticas para gestão do mesmo (BOP, 2021). Uma medida que pode ser tomada para cumprir o requisito do princípio da precaução é obrigar o desenvolvedor eólico *offshore* a estabelecer programas de monitoramento contínuo, além das condições estritas da licença. Uma revisão do sistema de subsídio de energia eólica *offshore* ocorreu no final de 2013 e no anterior; além disso, o governo belga incorporou certas obrigações para o estabelecimento da plano espacial marinho (NOONAN *et al.*, 2018; WIND EUROPE, 2021).

Em 20 de março de 2014, a Bélgica aprovou um plano espacial marinho por Decreto Real; em primeiro lugar, o plano deve ser o resultado de um procedimento de planejamento e um inquérito público; em segundo lugar, o plano deve ser objeto de uma avaliação ambiental estratégica avaliação (SEA) e precisa fornecer um procedimento de alteração (BOP, 2021). Além disso, o plano será avaliado a cada seis anos e será revisado após a avaliação, se necessário. O plano também precisa perseguir diversos aspectos econômicos, sociais e metas ambientais, além de metas de segurança com um mínimo de objetivos eficazes e indicadores confiáveis para atingir a meta desejada ou mudança comportamental desejada. O governo, no entanto, não tem que esperar seis anos para intervir e responder a novos desenvolvimentos; a possibilidade de desenvolver um procedimento de alteração intermediária (GENDT, 2018; NOONAN *et al.*, 2018). O plano espacial é válido por um período de seis anos, dessa maneira em 2020, um novo plano entrou em efeito; nesta revisão do espaço plano marinho plano, o governo belga delineou uma segunda zona para energia renovável de 284 km² localizada a 35-40 km da costa, esta seria adequada para um adicional de 2 GW de capacidade instalada (NOONAN *et al.*, 2018; IRENA, 2018).

Os princípios ambientais nos quais a lei se baseia são: (i) princípio da precaução; (ii) princípio preventivo; (iii) princípio do desenvolvimento sustentável; (iv) o princípio do poluidor-pagador e; (iv) o princípio de restauração. Um programa de pesquisa direcionado foi projetado a fim de determinar sob em que condições o desenvolvimento de energias

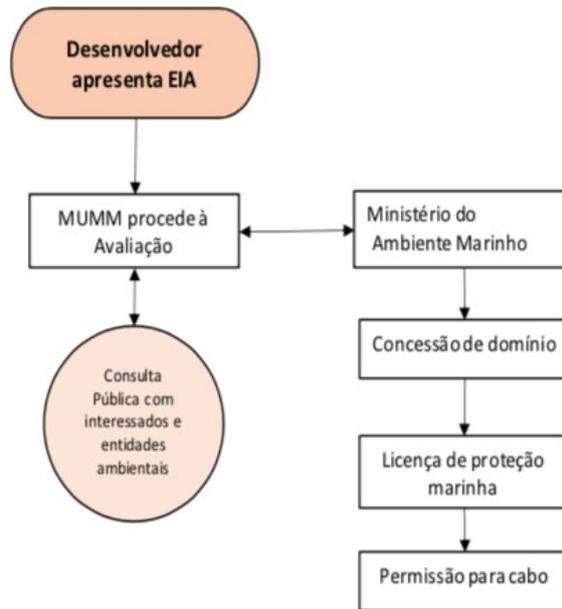
renováveis é compatível com os valores naturais de esta área marinha protegida - este programa começou em 2019 e terá a duração de quatro anos, os desenvolvedores de parques eólicos *offshore* precisam levar esses princípios em consideração durante suas atividades no mar. Além disso, o governo precisa levar em consideração esses princípios ao elaborar o plano espacial. Este aspecto de consideração implica que os princípios servem apenas como diretrizes, que precisam ser avaliados caso a caso (MUMM, 2019). Os desenvolvedores na Bélgica devem, portanto, obter licenças de domínio e ambientais para a zona de desenvolvimento e autorização de construção/operação, expedida pelo Ministério do Meio Ambiente para realizar uma determinada atividade sob determinadas condições e durante um determinado período. As operadoras recebem subsídio para cada megawatt-hora produzido em uma garantia preço mínimo acima de 20 anos; após o término do período de subsídio, um projeto de vida de 10 anos extensão (sem subsídio) é possível (GENDT, 2018). As **Figuras 3.5.1 e 3.5.2** demonstram o processo de arrendamento e consentimento (respectivamente) na Bélgica.

Figura 3.5.1: Síntese do processo de arrendamento na Bélgica.

| | |
|--|--|
| Princípio(s) Líder(es) para Outorga da Concessão | Procedimento competitivo - mediante "Concurso". |
| Órgão(s) Responsável(is) | <ul style="list-style-type: none"> • Ministério da Energia • Ministério do Meio Ambiente • Unidade de Gestão dos Modelos Matemáticos do Mar do Norte (MUMM) |
| Planejamento Espacial / Seleção de áreas / Alocação do Site | <ul style="list-style-type: none"> • O governo identifica áreas adequadas para parques eólicos offshore, mediante planejamento espacial marinho. |
| Encaminhamento da Solicitação do Site | Sistema "Porta Aberta", por iniciativas dos desenvolvedores. |
| Avaliação de Impacto Ambiental | Realizada pelo desenvolvedor, avaliada pelo MUMM e submetida a consulta pública. |
| Licenças / Permissões / Condições | <ul style="list-style-type: none"> • Concessão de domínio; • Licença de proteção marinha; • Permissão para instalação de cabos elétricos. |

Fonte: BARBOSA, 2018.

Figura 3.5.2: Processo de consentimento de parques eólicos *offshore* na Bélgica.



Fonte: BARBOSA, 2018.

No sistema federal belga, a competência em matéria de energia é partilhada: cada uma das três regiões (Flandres, Valónia e Bruxelas) possuem jurisdição sobre sua própria política energética, com exceção de usinas nucleares e a regulamentação da rede de transmissão. Enquanto a jurisdição das regiões é territorial, o Governo Federal permanece responsável pelo mar territorial e pela ZEE e pode em função disso, regular as atividades *offshore*. Isso explica porque o quadro legal para o desenvolvimento de parques eólicos *offshore* na Bélgica é estabelecido de acordo com os Artigos 6 e 7 da Lei da Eletricidade. Além disso, é importante notar que a zona reservada no BPNS (*Belgium Part of North Sea*) para energia eólica *offshore* exploração é definida pelo Decreto Real de 17 de maio de 2004. A área designada para o vento *offshore* a energia cobre 270 km² para uma capacidade total de 2.000 MW, dos quais aproximadamente 170 km² são atualmente já ocupada por projetos existentes (GENDT, 2018; NOONAN *et al.*, 2018).

Com preços de exercício tão baixos sendo concedidos em águas próximas à Holanda, os desenvolvedores na Bélgica estão sob muita pressão para reduzir os custos. A operadora de rede de transmissão privatizada *Elia* fornece acesso a todos os parques eólicos na Bélgica e é responsável por equilibrar o fornecimento de eletricidade. O desenvolvedor arca com os

custos da rede ligação à subestação *onshore*. Há subsídio é distribuído por 5 anos (fornecendo 20% cada ano) coberto pelo *Elia*. Dessa maneira, não há encargos regulatórios adicionais impostos aos operadores de parques eólicos na Bélgica (NOONAN *et al.*, 2018; IRENA, 2018). Em função do Real Decreto relativo ao estabelecimento do plano espacial marinho e seus quatro anexos, existe um delineamento muito detalhado das áreas que são designadas para atividades específicas e onde certas atividades são proibidas. As atividades permitidas podem envolver atividades que estão sujeitas a licenças e que fazem uso das áreas designadas (GENDT, 2018).

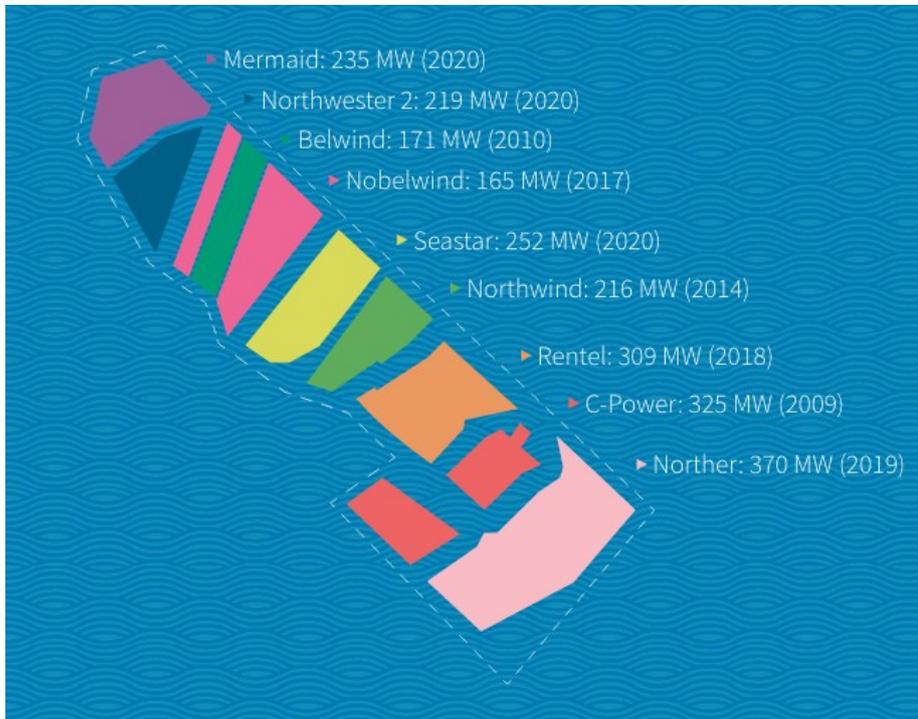
3.5.2. *Custo de Energia*

Espera-se que o setor eólico *offshore* contribua significativamente para as metas de energia renováveis da Bélgica, o preço corrigido da eletricidade é o preço médio de mercado por um ano reduzido em 10% para compensar o fato de que os investidores são incentivados pelos credores a celebrar contratos de longo prazo (dada a diferença entre o preço dos contratos a termo de longo prazo e o mercado *spot*). O operador eólico *offshore* pode receber um preço máximo, atualmente fixado em € 138/MWh. Para instalações *offshore* após 30 de junho de 2017 e antes de 1 de janeiro de 2021, o LCOE pode ser revisado a cada três anos se houver evidência de eficiência de custo em tecnologia (POUDINET *et al.*, 2017).

Na Bélgica, a duração do apoio é de 20 anos e a produção de eletricidade subsidiada não está sujeita a um limite de horas de carga total. Após esse período, o desenvolvedor eólico *offshore* receberá o preço de mercado. Além disso, o preço garantido não é ajustado pela inflação e se o custo da ligação à rede for pago pelo proprietário do parque eólico, o preço máximo garantido aumentará para € 150/MWh. Além disso, se houver excedente de produção no mercado, o preço do certificado cairá a zero por no máximo 72 horas por ano (NOONAN *et al.*, 2018; GENDT, 2018; POUDINET *et al.*, 2017).

As condições do local (profundidade da água e distância à costa) são semelhantes à linha de base; no entanto, a Bélgica tem a menor velocidade média do vento dos países neste estudo, o que resulta em uma produção de energia inferior. A Bélgica se beneficia de um custo atraente de financiamento antes de incorporar o regime tributário local, que é a maior taxa de imposto dos países europeus modelados. Esta taxa mais elevada contribui para o LCOE final de € 139/ MWh (\$ 160/MWh) (NOONAN *et al.*, 2018)

Figura 3.5.3: Mapa de parques eólicos *offshore* da Bélgica.



Fontes: Elaboração adaptada dos sites BOP e www.dreamtime.com.



Verifica-se através de análise do setor, que o volume de instalações eólicas *offshore* anuais deverá quadruplicar de 6,1 GW em 2020 a 23,9 GW em 2025, elevando sua participação nas novas instalações globais dos atuais 6,5% para 21% em 2025. Outrossim, a energia eólica *offshore* já possui o LCOE competitivo em certos países, por exemplo: Alemanha, Holanda com leilões de subsídio zero; e está no limite de competitividade em

outros mercados europeus (principalmente no Reino Unido). Espera-se, dessa maneira, que seja competitivo também em outros locais por todo o mundo até 2030, enquadrando-se na faixa de custos de combustíveis fósseis (gás/carvão). Tal condição de competitividade se deve principalmente: (i) ao reflexo das especificações do local do projeto estarem ligadas às profundidades da água; e (ii) à distância da costa e aos tipos de fundação de fundo fixo usados e ao tamanho das turbinas instaladas (GWEC, 2021; IEA, 2019; HANNON *et. al.*, 2019).

Enquanto isso, os custos associados dos ativos de transmissão *offshore* representam mais de 20% dos custos totais do projeto, principalmente relacionados à distância real até a costa, o tipo de cabo empregado e o tamanho das subestações *offshore* necessárias. Os parques eólicos flutuantes *offshore* estão ganhando impulso, abrindo locais para projetos em águas profundas. Para projetos a serem comissionados antes de 2025, os custos deverão permanecer diversificados e vinculados aos desenvolvimentos de mercados regionais (IEA, 2019; HANNON *et. al.*, 2019).

O desenvolvimento da energia eólica *offshore* foi impulsionado por esquemas de apoio dos governos; no entanto, as recentes reduções de custo associadas à segurança energética aumentam a perspectiva de a energia eólica *offshore* se tornar mais barata do que a geração de energia convencional. Muitos países utilizam leilões para fornecer suporte financeiro; no entanto, as diferenças no modelo de leilão tornam seus resultados difíceis de comparar. Neste contexto, os principais players mundiais de energia eólica (UE e China) têm atuado de forma diferente no desenvolvimento da energia eólica *offshore*, em ritmos e graus diferentes. Suas ações vão desde o estudo dos recursos de energia eólica *offshore* até o desenvolvimento de leis, estratégias e planos para construir parques eólicos nas melhores localizações do ponto de vista dos recursos eólicos, evitando o conflito com outros interesses marítimos (DE CASTRO *et al.*, 2019; IEA, 2019; CASTRO *et. al.*, 2018).

No que se refere à Europa, a energia eólica *offshore* continuará a crescer, especialmente no Reino Unido a partir de 2023 (com a entrada de operação dos CfD 3), entre outros projetos no leste europeu. O continente liderou a energia eólica *offshore* (84% das instalações globais) desde o primeiro projeto eólico *offshore*; desde então, a energia eólica *offshore* atingiu o nível de maturidade exigido, tanto tecnologicamente quanto com – comercialmente. Ademais, a introdução de um sistema de balcão único no processo de licenciamento e o estabelecimento de FITs mais elevados ajudarão a energia eólica *offshore* a se desenvolver ainda mais na China. A indústria de energia eólica chinesa experimentou um

rápido desenvolvimento desde a introdução da Lei de Energia Renovável da China em 2005, que foi uma tentativa de reduzir o consumo de carvão, o país continuará sendo o maior contribuinte asiático (e mundial) do setor no próximos cinco anos. Seu desenvolvimento tecnológico também atingiu um alto nível, de tal forma que a maioria das turbinas agora são construídas por fabricantes chineses (DE CASTRO et al., 2019; IEA, 2019; WILLIAMS; DOYON, 2019).

Dessa maneira, a **Tabela 3.2** resume o *ranking* em questão, apresentando as devidas extensões costeiras de cada um dos cinco países analisados, uma vez que o desenvolvimento de tal tecnologia depende diretamente de localização litorânea e, conseqüentemente, acesso às suas respectivas costas marítimas. Além disso, destaca os incentivos fiscais, políticas energéticas relacionadas ao setor de energia eólica *offshore* atrelados às metas dos países analisados:

Tabela 3.2: Ranking de países e dados técnicos

| Posição | País | Breve descrição do esquema de apoio à política atual | LCOE (USD/kWh) (2019) | Extensão da costa (km) | Distância média da costa (km) | Capacidade instalada (GW) | Parques eólicos offshore em operação | Profundidade média (m) | Políticas energéticas de incentivo à energia eólica offshore | Fator de Capacidade (%) | Meta |
|---------|-------------|--|-----------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|------------------------|--|-------------------------|---------------|
| 1° | Reino Unido | <p>Contract for Difference</p> <p>O ‘contrato por diferença’ é um modelo <i>FiT / FiP</i> em que os vencedores do leilão têm direito ao pagamento ‘complementar’. O pagamento complementar é fornecido quando o preço de mercado está abaixo do preço de exercício do contrato <i>C/D</i>. Quando o preço de mercado é superior ao preço de exercício, os geradores devem devolver a diferença.</p> | 0.121 | 12.429 | 43 | 10.43 | 43 | 27 | UK Offshore Sector Deal | 19.7 | 30GW/2030 |
| 2° | Alemanha | <p>Feed-in-Premium</p> <p>O FiP é calculado como a diferença entre o preço de mercado e o preço máximo garantido que tradicionalmente era definido administrativamente. As alterações à Lei Alemã de Energia Renovável (EEG) entraram em vigor em 2017 e declararam que a energia eólica offshore estará sujeita a leilões e não pode mais ser remunerada por meio de preços administrativos.</p> | 0.120 | 3.700 | 40 | 7.69 | 31 | 29 | The Renewable Energies Act | 6.8 | 15-20 GW/2030 |
| 3° | China | <p>Feed-in-Tariff</p> | 0.112 | 14.500 | 15 | 6.80 | 49 | 13 | 14th Five-Year Plan | 25.9 | 15GW/ |

| | | | | | | | | | | | |
|----|---------|---|-------|-------|----|------|----|----|---|------|-----------------|
| | | A NEA deveria ser responsável pela seleção das propostas emitidas pelos promotores e concordar com as taxas <i>FiT</i> , enquanto a SOA seria responsável pela aprovação do local. | | | | | | | | | 2025 |
| 4° | Holanda | <p>Feed-in-Premium</p> <p>Um <i>FiP</i> baseado em licitação que concede subsídio e consentimento para construir e operar um parque eólico <i>offshore</i> ao desenvolvedor de custo mais baixo para cada zona, conforme especificado pelo governo. Os geradores eólicos <i>offshore</i> vendem sua eletricidade no mercado e recebem um prêmio como a diferença entre o preço máximo garantido e o preço de mercado (corrigido). O preço máximo garantido é determinado por meio de licitação e é limitado de forma a garantir redução de custos.</p> | 0.120 | 1.000 | 26 | 2.61 | 10 | 25 | The Offshore Wind Energy Roadmap | 34.9 | 11.5 GW/2030 |
| 5° | Bélgica | <p>Feed-in-Premium</p> <p>O esquema de suporte é baseado em um certificado verde, o <i>Elia</i>. O valor do certificado é a diferença entre o preço fixo garantido e o preço corrigido de mercado o que, na prática, torna o modelo de apoio belga uma forma de <i>FiP</i>.</p> | 0.119 | 78 | 40 | 2.26 | 9 | 27 | Draft National Energy and Climate Plan | 28.8 | 4GW/20 30 |

Fonte: Elaboração própria com base em dados de: Poudineh *et. al.*, 2017; IEA, 2019; IRENA, 2019; GWEC, 2021; 4COffshore, 2021.

4. BREVE APRESENTAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

Analisar a disponibilidade das fontes de energia que um país utiliza é um critério fundamental ao se definir o seu planejamento econômico (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). À medida que a economia de um Estado em desenvolvimento cresce e o poder aquisitivo melhora, também aumenta o consumo, sanando a disponibilidade de recursos que, muitas vezes, são não renováveis, conforme fatores climáticos e geográficos (ABREU *et al.*, 2010). Conforme sugere a história do setor energético brasileiro, o Modelo Antigo, adotado desde 1930, foi supostamente bem-sucedido até meados da década de 1970 até ser efetivamente substituído no ano de 1995 pelo Modelo de Livre Mercado, centrado no investimento privado (nacional e internacional), na abertura externa e na valorização do mercado adaptado ao momento de globalização (**Tabela 4.1**) (CCEE, 2020; LEITE *et al.*, 2019).

Dessa maneira, as preocupações e os princípios estabelecidos na legislação internacional sobre desenvolvimento econômico e sustentabilidade foram introduzidos no Brasil, principalmente a partir da Constituição Federal Brasileira de 1988 (MYSZCZUK; SOUZA, 2018). O processo político de reformas econômicas no País (e no continente) durante a década de 1990 foi marcado por dois grandes fatores hegemônicos: (i) a redução do papel do Estado na economia, com sua conseqüente transformação; e (ii) a redefinição das relações entre economias nacionais e o mercado internacional (nova estratégia de integração na economia mundial globalizada) (LEME, 2009). Em 2004, houve a última reformulação para o Novo Modelo do Setor Elétrico (NMSE), fruto do Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro (RE-SEB), que atualmente está em vigor (CCEE, 2020). Em vista de estratégias para este desenvolvimento, países calculam periodicamente quantos recursos energéticos disponíveis possuem, dentre os quais estão os meios utilizados para se locomover através de meio de transportes e gerar eletricidade.

Tabela 4.1: Mudanças no SEB

| Variável | Modelo Antigo até 1995 | Modelo de Livre Mercado 1995-2003 | Novo Modelo 2004-atualmente |
|--|--|--|--|
| Modelo de financiamento | Financiamento através de recursos públicos | Financiamento através de recursos públicos e privados | Financiamento através de recursos públicos e privados |
| Natureza da empresa | Empresas verticalizadas | Empresas divididas por atividade: geração, transmissão, distribuição e comercialização | Empresas divididas por atividade: geração, transmissão, distribuição, comercialização, importação e exportação. |
| Origem de Empresas do Setor | Empresas predominantemente estatais | Abertura e ênfase na privatização das Empresas | Convivência entre empresas estatais e privadas |
| Modelo de Competição | Monopólios - Competição inexistente | Competição na geração e comercialização | Competição na geração e comercialização |
| Perfil de Consumidor | Consumidores Cativos | Consumidores Livres e Cativos | Consumidores Livres e Cativos |
| Ambiente de Mercado | Tarifas reguladas em todos os segmentos | Preços livremente negociados na geração e comercialização | No ambiente livre: Preços livremente negociados na geração e comercialização. No ambiente regulado: leilão e licitação pela menor tarifa |
| Mercado Livre /Regulado | Mercado Regulado | Mercado Livre | Convivência entre Mercados Livre e Regulado |
| Modo de Planejamento do Setor | Planejamento Determinativo - Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos (GCPS) | Planejamento Indicativo pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) | Planejamento pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) |
| Modo de Contratação | Contratação: 100% do Mercado | Contratação: 85% do mercado (até agosto/2003) e 95% mercado (até dez./2004) | Contratação: 100% do mercado + reserva |
| Liquidação de sobras/ déficits do balanço energético | Sobras/déficits do balanço energético rateados entre compradores | Sobras/déficits do balanço energético liquidados no MAE | Sobras/déficits do balanço energético liquidados na CCEE. Mecanismo de Compensação de Sobras e Défis (MCS) para as Distribuidoras |

Fonte: Elaboração própria adaptada de dados da CCEE (2020).

Esse conjunto corresponde à matriz energética (CBIE, 2020), é ¹⁵chamado de Balanço Energético Nacional (BEN)¹⁶, documentação acompanhada e consolidada através do relatório anual do Ministério de Minas e Energia (MME)¹⁷, (EPE, 2020a). Da mesma forma, a matriz elétrica (outro conceito-chave no contexto de energia) é formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica e está incluída na matriz energética (EPE, 2020a; CBIE, 2020).

Estes dados compõem a política energética do País, que, por sua vez, é um dos grandes alicerces da proposta de adequação institucional e legal do arcabouço governamental (PIRES *et al.*, 2008). Vale lembrar que a existência de regulação também é de extrema importância e necessidade, por tratar-se de setor tão estratégico como o energético (BELTRAME; NETO, 2017) e, conseqüentemente, ao planejamento e/ou controle das metas/objetivos nacionais.

4.1. As instituições do Setor Elétrico Brasileiro (SEB)

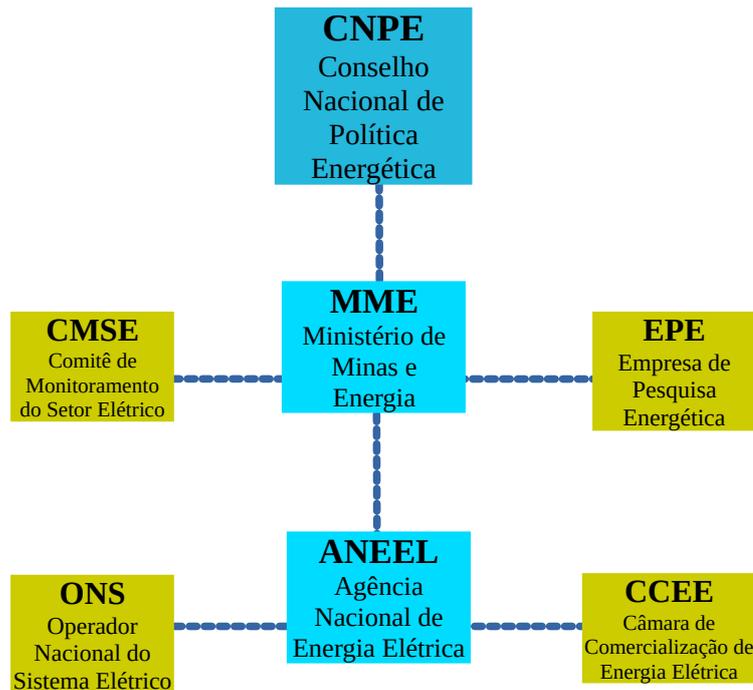
O Setor Elétrico Brasileiro (SEB) passou por importantes alterações de cunho estrutural e institucional visando a atender demandas de utilização do Brasil, considerado um país que possui diversidade única de recursos na sua matriz energética (ANEEL, 2005; SANTOS *et al.*, 2008; EPE, 2018). O Novo Modelo do Setor Elétrico (NMSE) criou novas instituições e redefiniu atribuições às existentes. No atual arcabouço setorial, figuram os seus principais entes, conforme o organograma (**Figura 4.1**) (CCEE, 2020a):

15 É o órgão do governo federal responsável pela condução das políticas energéticas do país (CCEE, 2020).

16 extensa pesquisa e contabilidade relativas à oferta e consumo de energia no Brasil, realizada anualmente contemplando as atividades de extração de recursos energéticos primários, sua conversão em formas secundárias, a importação e exportação, a distribuição e uso final da energia (EPE, 2020a).

17 É o órgão do governo federal responsável pela condução das políticas energéticas do País (CCEE, 2020).

Figura 4.1: Instituições do SEB



Fonte: Elaboração própria adaptada a partir da CCEE (2020a).

A seguir, faz-se uma breve descrição destas instituições e suas devidas funções no SEB (CCEE, 2020a; ONS, 2020; ANEEL, 2020):

- i. Conselho Nacional de Política Energética (CNPE):** criado pela Lei nº 9.478/1997, elabora as políticas/diretrizes energéticas nacionais e define premissas para gerenciamento do setor. É o ente responsável por assessorar o Presidente da República e é presidido pelo MME.
- ii. Ministério de Minas e Energia (MME):** criado pela Lei nº 8.422/1992, concentra a função de planejamento/implementação setorial de acordo com as diretrizes definidas pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). O MME representa a União como Poder Concedente e é responsável pela condução das políticas energéticas do País. Ademais, deve monitorar a segurança de suprimento, determinar

ações preventivas para restauração da segurança de suprimento no caso de desequilíbrios conjunturais entre oferta/demanda de energia.

iii. Empresa de Pesquisa Energética (EPE): criada pela Lei nº 10.847/2004, é a instituição cuja finalidade é a prestação de serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético - instituição vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME).

iv. Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE): criado pela Lei nº 10.848/2004, tem a função de acompanhar e avaliar a continuidade e segurança do suprimento elétrico em todo o território nacional - é um órgão sob coordenação direta do Ministério de Minas e Energia (MME).

v. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL): criada pela Lei nº 9.427/1996, é a autarquia responsável pela regularização/fiscalização de atos do setor elétrico; zelar pela qualidade dos serviços prestados; promover os leilões de energia elétrica. As alterações promovidas em 2004 pelo atual modelo do setor estabeleceram como responsabilidade da ANEEL, direta ou indiretamente, a promoção de licitações na modalidade de leilão para a contratação de energia elétrica pelos agentes de distribuição do Sistema Interligado Nacional (SIN)¹, sendo uma instituição vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME).

vi. Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS): criado pela Lei nº 9.648/1998, é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) e pelo planejamento da operação dos sistemas isolados do país, sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

vii. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE): criada pela Lei nº 10.848/2004, é a instituição responsável pelo equilíbrio operacional do mercado de comercialização de energia. Atua em sintonia com as demais instituições do SEB, na comercialização de energia elétrica no SIN, em ambientes de contratação regulada e livre – é uma associação civil sem fins lucrativos.

4.2. O Setor Elétrico Brasileiro (SEB)

O SEB possui um modelo de operação diferenciado em relação ao restante do mundo, ademais o Brasil há enorme potencial energético a ser explorado, implicando em constantes inovações tecnológicas e regulatórias (CCEE, 2020; ANEEL, 2019). O SEB possui basicamente dois sistemas, são eles: (i) sistema principal – composto por usinas, linhas de transmissão e ativos de distribuição, abrangendo maior parte do território nacional, o Sistema Interligado Nacional (SIN) (**Figura 4.1**); e (ii) sistemas isolados – que possuem menor porte, desconectados do SIN (ANEEL, 2008; EPE, 2018a). A principal função do SIN (através de coordenação/controle de operação do ONS) é conectar usinas geradoras aos centros de carga das distribuidoras em cada região, permitindo a permuta energética entre diferentes regiões e evitar que diferentes regimes pluviiais em diferentes regiões afetem o abastecimento de energia elétrica em nível nacional (WALVIS; GONÇALVES, 2014).

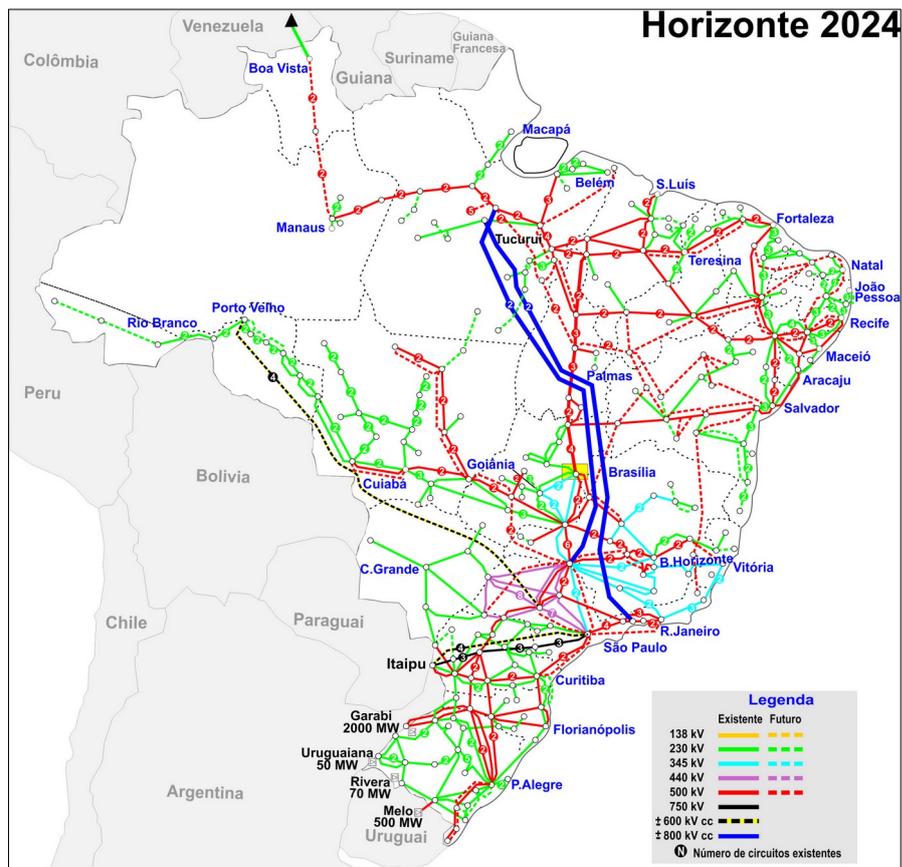


Figura 4.2: Sistema de Transmissão de Energia

Fonte: ONS (2019).

O SIN é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte (ONS, 2020a). Quanto aos sistemas isolados, o Decreto nº 7.246/2010 os define como sistemas elétricos de serviço público de distribuição de energia elétrica que em sua configuração normal não estejam eletricamente conectados ao SIN, seja por razões técnicas ou econômicas (EPE, 2018a).

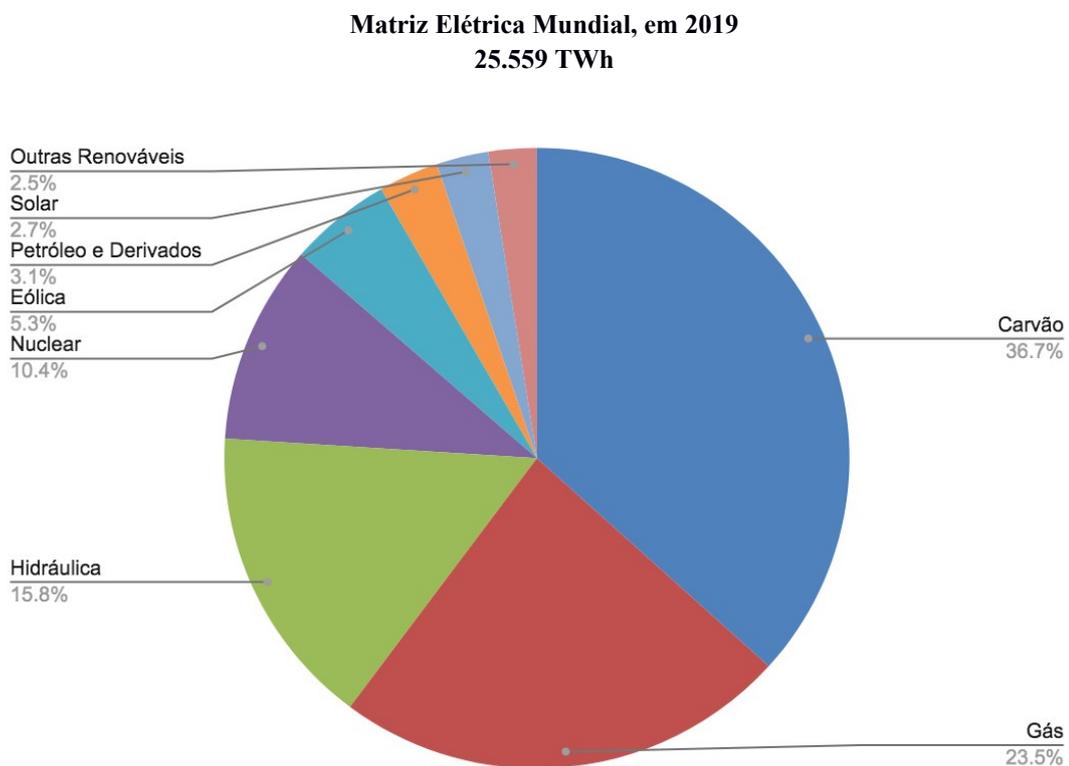
Analisando os sistemas isolados (SIs) por estado, nota-se que a maior parte das localidades atendidas por estes no Brasil está situada na região Norte (Rondônia, Acre, Amazonas, Roraima, Amapá e Pará), ilha de Fernando de Noronha (Pernambuco) e Mato Grosso (**Tabela 4.4**). Vale lembrar que Boa Vista (Roraima) é a única capital que ainda é atendida por um sistema isolado. Nestas localidades o consumo representa menos de 1% da carga total do País; sendo assim, a demanda por energia dessas regiões é suprida, principalmente, por térmicas a óleo diesel (ONS, 2020a; EPE, 2018a). Ademais, a população atendida por sistemas isolados (3.254.685) representa aproximadamente 1,5% da população total no País (209.469.333) (BM, 2020) - o que demonstra, portanto, o alto grau de abrangência do SIN na demanda populacional brasileira.

O SEB possui basicamente dois sistemas, são eles: (i) sistema principal – composto por usinas, linhas de transmissão e ativos de distribuição, abrangendo maior parte do território nacional, o Sistema Interligado Nacional (SIN) (**Figura 4.2**); e (ii) sistemas isolados – que possuem menor porte, desconectados ao SIN (ANEEL, 2008; EPE, 2018a). A principal função do SIN (através de coordenação/controle de operação do ONS) é conectar usinas geradoras aos centros de carga das distribuidoras em cada região, permitindo a permuta energética entre diferentes regiões e evitar que diferentes regimes pluviais em diferentes regiões afetem o abastecimento de energia elétrica em nível nacional (WALVIS; GONÇALVES, 2014). O SIN é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte (ONS, 2020a). Quanto aos sistemas isolados, o Decreto nº 7.246/2010 os define como sistemas elétricos de serviço público de distribuição de energia elétrica que em sua configuração normal não estejam eletricamente conectados ao SIN, seja por razões técnicas ou econômicas (EPE, 2018a).

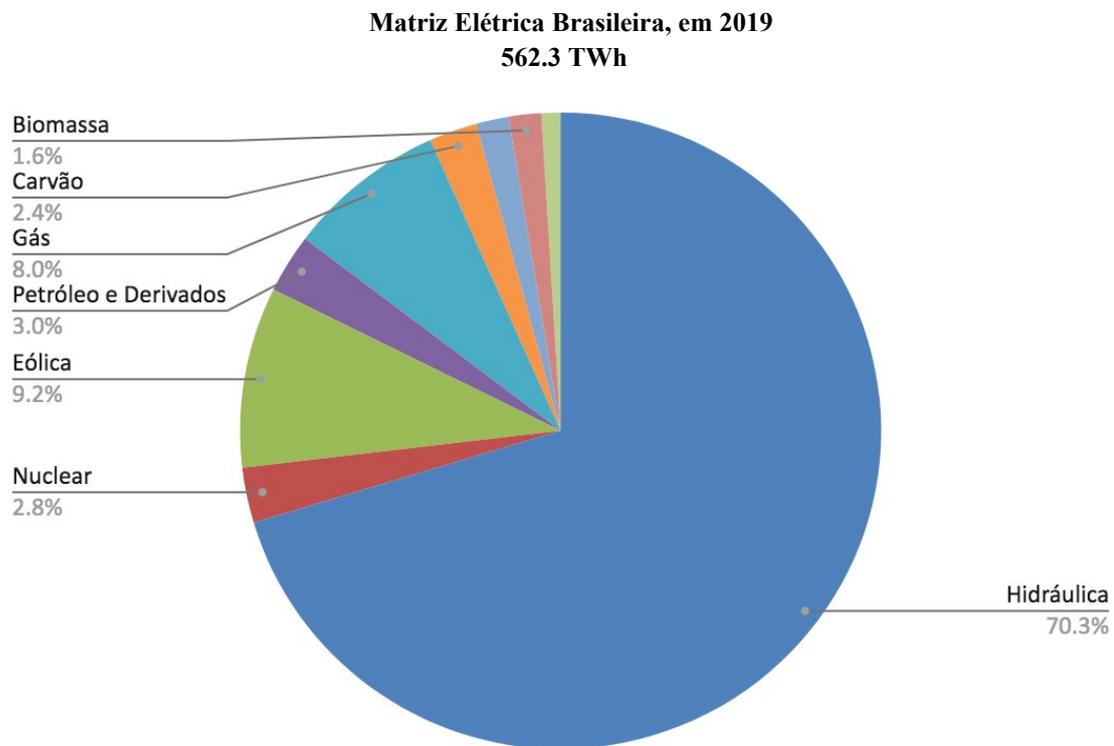
4.3. Matriz Elétrica Brasileira

O Brasil é o quinto mais extenso e quinto mais populoso país no mundo, de modo que o crescimento da produtividade e o fortalecimento da sua indústria são os principais desafios enfrentados pela economia (CPFL, 2014). Apesar da geração de energia elétrica por hidrelétricas no Brasil (72.8%) aproximadamente o dobro do correspondente à Matriz Elétrica Global (**Figura 4.3**), o parque gerador nacional terá de contar com outras fontes para operação de base durante períodos secos, a fim de atender à demanda crescente (ONS, 2020; CPFL, 2014) e mitigar vulnerabilidades quanto ao risco hidrológico.

Figura 4.3: Matriz Elétrica Mundial e Matriz Elétrica Brasileira (2019).



Fonte: Elaboração própria adaptada de dados IEA, 2020.



Fonte: Elaboração própria adaptada de dados IEA, 2020.

Outrossim, verifica-se que a geração térmica tem desempenhado um papel estratégico complementar no atendimento de tais demandas de pico do sistema e, principalmente, no suprimento de energia elétrica a municípios e comunidades não atendidos pelo sistema interligado (CCEE, 2020b). Dessa maneira, pode-se destacar também a utilização de biomassa na matriz elétrica brasileira, de gás natural (GN) (que deverá ser abundante) e mesmo nuclear (CBIE, 2019). Entretanto, o Brasil já realiza investimentos e incentivos a projetos de pesquisa e desenvolvimento de fontes alternativas, como: eólica (nas regiões Nordeste e Sul) e fotovoltaica (nas regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste) (LEITE *et al.*, 2017; EPE, 2017). Resulta que a matriz elétrica brasileira, portanto, é baseada em grau de utilização das fontes renováveis de energia (86.7%) superior aos índices da matriz elétrica mundial (36.7%) (**Figura 4.3**).

O principal objetivo das políticas públicas de expansão da capacidade de geração de eletricidade a partir de fontes renováveis é diminuir a emissão de GEE derivados da queima de combustíveis fósseis; de igual maneira, o aumento da oferta de energia renovável na geração total dos países acaba reduzindo simultaneamente a produção das centrais térmicas e os preços de mercado (CASTRO *et al.*, 2014) - o que pode ser viável, uma vez que o Brasil

enfrenta momento de reestruturação do mercado para o setor elétrico. De maneira geral, o modelo desenvolvimento da indústria de energia no mundo tem sido desafiado em diversas dimensões: da sustentabilidade ambiental, da segurança de abastecimento, do desenvolvimento tecnológico, e da capacidade de ganhos de eficiência (CASTRO; DANTAS, 2016).

Em vista dos dados apresentados (Figura 3), o SEB já demonstra, através de incentivos, políticas pública e dotação de recursos naturais, a inserção significativa de fontes renováveis na sua matriz elétrica. Verificam-se a seguir (de maneira breve) as fontes de energia já comercializadas no Brasil que se demonstram potencialmente representativas/estratégicas na transição energética (e no futuro) para o caso brasileiro

4.4. Agentes do Setor Elétrico Brasileiro e o Mercado de Energia

No grupo dos agentes do SEB, incluem-se: (i) geradoras; (ii) transmissoras; (iii) distribuidoras; e (iv) comercializadoras de energia elétrica. As principais características de tais atores são brevemente apresentadas a seguir (ONS, 2020; CCEE, 2020; ANEEL, 2020):

- i. **Geradoras:** são os agentes responsáveis pelas atividades de produção de energia (a partir de qualquer fonte), outorgados a título de Poder Concedente; há três classes de geradoras: concessionários de serviço público de geração, produtores independentes de energia elétrica e autoprodutores;
- ii. **Transmissoras:** são os agentes titulares de concessão ou equiparados com delegação do Poder Concedente para a prestação do serviço público de transmissão de energia elétrica;
- iii. **Distribuidoras:** é a instituição detentora de concessão, permissão ou autorização para distribuir energia elétrica, bem como os agentes que direta ou indiretamente, isoladamente ou em conjunto, detêm participação acionária nessa empresa, participando do grupo de controle e sejam signatários do Acordo de Acionistas e/ou do Contrato de Concessão; e
- iv. **Comercializadoras:** são os titulares de autorização, concessão ou permissão para fins de realização de operações de compra e venda de energia elétrica na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE).

A crise do sistema energético em 2003 ocasionou a criação de novas regras instituídas

para o modelo de comercialização de energia dando origem ao Novo Modelo do Setor Elétrico (NMSE), que tomou quatro grandes medidas: (i) criou dois ambientes de contratação no mercado atacadista: Ambiente de Contratação Livre (ACL) e Ambiente de Contratação Regulada (ACR); (ii) implementou mudanças institucionais, reorganizando as competências dos órgãos públicos do setor energético e criando a CCEE; (iii) instaurou a retomada do planejamento do setor através de leilões e da EPE; e (iv) criou programas de universalização, segurança jurídica e estabilidade regulatória.

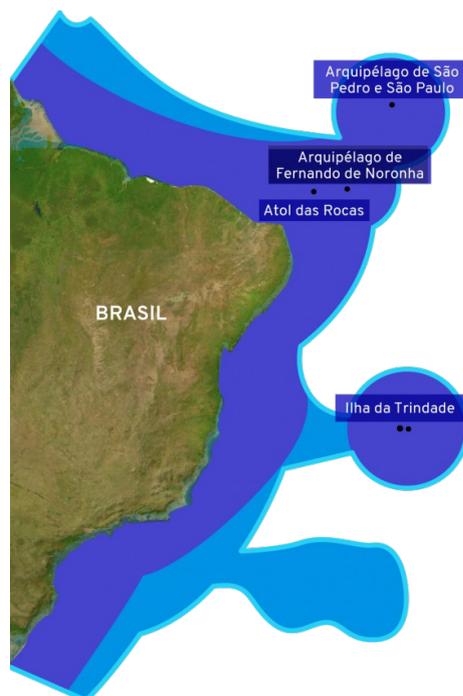
A comercialização de energia elétrica passou a contar com dois ambientes de negociação a partir de 2004: o Ambiente de Contratação Regulada – ACR, no formato de leilão (com agentes de geração e de distribuição de energia); e o Ambiente de Contratação Livre – ACL com geradores, distribuidores, comercializadores, importadores e exportadores, além dos consumidores livres e especiais.

5. PERSPECTIVAS PARA O BRASIL

Esta seção analisará o caso brasileiro no tocante ao desenvolvimento da Energia Eólica *Offshore*; apesar de o país ter aproximadamente 7.500 km de extensão costeira, há necessidade de se explorar/explotar recursos de relevância estratégica contidos na “Amazônia Azul” perante sua sociedade através de meios adequados. Mediante breve análise, verifica-se que há pouca inserção comercial de tecnologias para a geração de energia do mar no Brasil, limitando-nos aos protótipos e desenvolvimento; dessa maneira, faz-se importante a efetivação dessas tecnologias na conscientização de uso do mar e seu aproveitamento atendendo às altas demandas energéticas, diminuindo custos operacionais, de dependência tecnológica, índices de emissões e seus impactos, efetivando a participação das mesmas na nossa matriz elétrica/energética.

Figura 5.1: Costa Brasileira e a “Amazônia Azul”

| | área em km ² |
|--------------------------------------|-------------------------|
| ■ Área total | 5.669.512 |
| ■ Zona Econômica Exclusiva | 3.574.811 |
| ■ Extensão da Plataforma Continental | 2.094.701 |
| ● Ilhas e arquipélagos | |



Fonte: MARINHA DO BRASIL, 2019.

O cenário atual do Brasil tem a vantagem de possuir modelos de mercado próximos ao de Energia Eólica *Offshore* e a readaptação de uma série de estruturas, recursos e até regulamentação de outras indústrias. Estes podem servir como instrumento importante ao planejamento de implementação para o Brasil, uma vez que há diferentes políticas, pontos regulatórios entre outros mecanismos de proteção dos mercados e o desenvolvimento dos mesmos que podem ser aprimorados a esse contexto oferecendo grande praticidade aos atores envolvidos (MME, 2007).

No Brasil, há grandes parques de Energia Eólica *Onshore* conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN) concentrados majoritariamente na região Nordeste - porém os primeiros projetos de Energia Eólica *Offshore* estão em fase de licenciamento ambiental destinados aos estados: Rio Grande do Norte, onde há o projeto piloto (**Figura 5.2**) da Petrobras em parceria tecnológica com a Empresa *Equinor*, que está inserido na estratégia para o desenvolvimento de fontes alternativas de energia em ambiente marítimo (PETROBRAS, 2018) – atualmente suspenso por questões estratégicas da empresa brasileira; o Projeto Asa Branca I; e Parque Eólico *Offshore* Caucaia, no Ceará – os últimos em fase avançada de licenciamento ambiental. Vale destacar que há outros três projetos em fase inicial de seus respectivos licenciamentos: Complexo Eólico Marítimo Jangada, no Ceará; Complexo Eólico Maravilha, no Rio de Janeiro; e Complexo Eólico Marítimo Águas Claras, no Rio Grande do Sul (EPE, 2019).

Figura 5.2: Primeiro aerogerador *offshore* em Guamaré (2018)



Fonte: PETROBRAS, 2018.

No tocante à Regulamentação de Usinas Eólicas *Offshore*, há o Projeto de Lei 11.247/2018, que consiste na autorização da implantação de usinas eólicas e solares *offshore*. O projeto está em tramitação e, mediante aprovação, as plataformas poderão ser instaladas no mar territorial (até 22 quilômetros da costa) e na zona econômica exclusiva (até 370 quilômetros). Ademais, consta no projeto a consulta aos principais órgãos e entidades relacionados ao setor (**Tabela 5.1**) e admite a implantação das usinas nas chamadas águas interiores – como lagos e rios. Outrossim, há o Projeto de Lei 576/2021, que disciplina a exploração e desenvolvimento da geração de energia a partir de fontes de instalação *offshore*, sob domínio da União em tramitação, de igual maneira ao anterior (ACN, 2021).

Conforme descrito na Seção 2, é comum a interação entre as iniciativas pública e privada (através de PPP) nos países desenvolvidos em Energia Eólica *Offshore*, como os exemplos de Reino Unido e Alemanha. Este fator será importante para compreender o posicionamento do Brasil se planejar neste mercado, cuja estruturação pode ser baseada em seis pontos-chave na visão de negócio: (i) ambições dos negócios na política; (ii) localização dos *sites* e desenvolvimento dos mesmos; (iii) as conexões e responsabilidades de cada órgão; (iv) subsídios ou estímulos econômicos para se investir; (v) *supply chain* para garantir energia limpa; e (vi) suporte à inovação, ou seja, aumentar os incentivos iniciais para maior viabilidade dos custos (YESTAD, 2019).

As experiências e aprendizados vivenciados por profissionais de diversos países europeus ao longo do processo de desenvolvimento da exploração do potencial eólico *offshore* resultaram em grande acúmulo de informações aos profissionais brasileiros (MMA, 2019). De igual maneira, faz-se importante ao estudo de caso brasileiro apresentar-se análises/avaliações como: (i) impactos ambientais das atividades relacionadas à instalação; (ii) operação e manutenção eólica *offshore*; e (iii) atividades de descomissionamento (HERNANDEZ *et al.*, 2021).

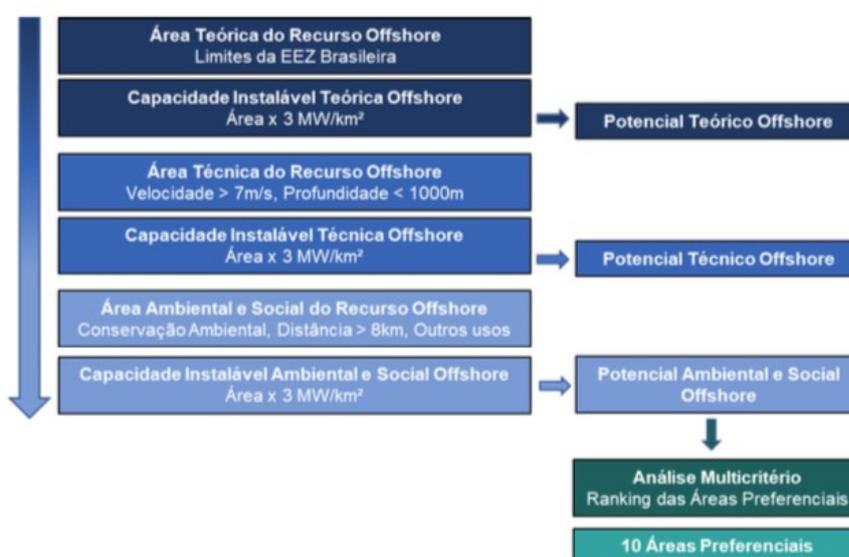
Outrossim, o cenário atual brasileiro já possui modelos de mercado próximos ao de Energia Eólica *Offshore* com a possibilidade da readaptação de uma série de estruturas, recursos e até regulamentação de indústrias com maior maturidade como por exemplo: (i) *Oil & Gas*; e (ii) Energia Eólica *Onshore* – podendo estes servir como instrumento importante ao planejamento de implementação para o Brasil, uma vez que há diferentes políticas, pontos regulatórios entre outros mecanismos de proteção dos mercados e o desenvolvimento dos

mesmos que podem ser aprimorados a esse contexto oferecendo grande praticidade aos atores envolvidos (IRENA, 2018).

Os principais motivos que dificultam o investimento nessa modalidade de geração no país são: (i) o alto potencial eólico *onshore* a ser explorado no Brasil, por ser mais competitiva; (ii) alto custo – apesar de as tendências demonstrarem que haverá redução de custos nos próximos anos (BEIRÃO *et al.*, 2019); (iii) incentivo governamental; (iv) falta de uma legislação/regulamentação específica para o setor – que atualmente está em desenvolvimento; e : é necessário agilizar todo o processo para que a área possa avançar (AQUILA *et al.*, 2017; FELDMANN, 2018; WEF, 2019).

As limitações de níveis de potencial de uma área podem ser descritas por: (i) teórico, que é dado pela potência nominal do sistema como se ele produzisse em capacidade plena na área jurisdicional do país, uma situação ideal onde os demais critérios são ignorados; (ii) técnico, em que são impostas, ao Potencial Teórico, exclusões técnicas, inerentes à tecnologia atual de aproveitamento do recurso de vento; e (iii) ambiental/social, consiste em exclusões sobre áreas do Potencial Técnico, que visam a manutenção das atividades humanas no meio marítimo e a preservação da natureza, em especial dos grupos mais afetados por projetos eólicos *offshore* (Figura 5.3) (SILVA, 2019).

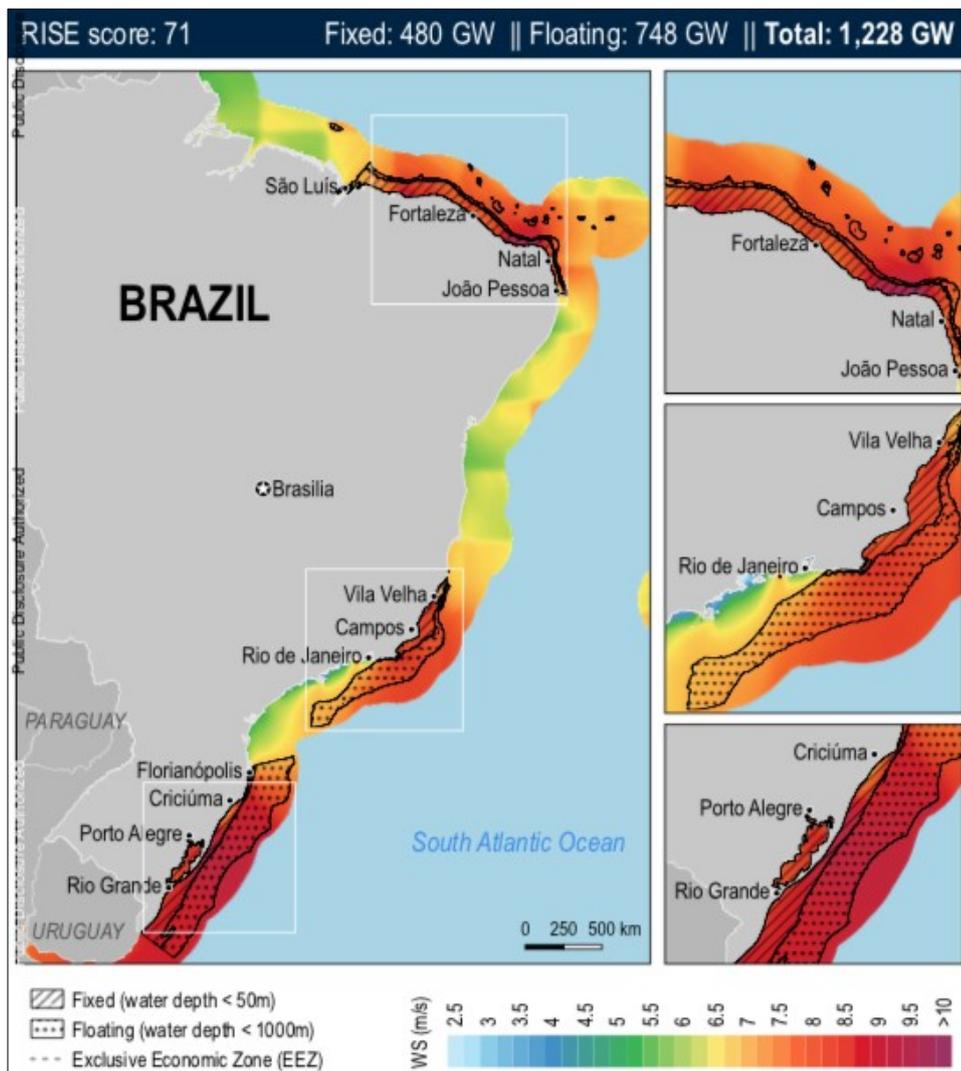
Figura 5.3: Etapas da Avaliação do Recurso Eólico *Offshore* do Brasil



Fonte: SILVA, 2019.

De acordo com a EPE (2020) há potencial técnico de cerca de 700 GW em locais com profundidade até 50m no litoral brasileiro (EPE, 2020). No Brasil, são identificados três *hotspots* em termos de disponibilidade de energia eólica *offshore* nos litorais de: (i) RN, CE, PI e MA (região Nordeste); (ii) ES e RJ (região Sudeste); e (iii) SC e RS (região Sul) (Figura 5.4) (HERNANDEZ *et al.*, 2021; BM, 2020).

Figura 5.4: Mapa do Potencial Técnico Eólico Brasileiro



Fonte: BANCO MUNDIAL, 2020

Vale destacar que foi elaborada neste mesmo contexto, uma avaliação do potencial técnico dos recursos eólicos *offshore* das regiões Sudeste e Sul cujos resultados demonstram

que mesmo com a área útil da região Sul menor que a área correspondente à Sudeste, a primeira apresenta maior potencial. Ademais, há uma maior área útil em lâminas d'água de até 50 m na região Sul em comparação com a região Sudeste, representando menores custos devido à utilização de fundações de fundo fixo. Outra informação relevante deste estudo é que o cálculo do potencial técnico considerando as áreas excluídas devido às restrições aplicadas reduz cerca de 71% do recurso eólico *offshore* utilizável nas regiões Sudeste e Sul da costa brasileira. No entanto, este potencial técnico disponível ainda é capaz de atender a demanda de energia elétrica de toda a região estudada (ASSIS TAVARES *et al.*, 2020).

Apesar de algumas diferenças nos resultados das estimativas de velocidade, todos os quatro estudos em parceria com a EPE (Wind Atlas; CEPEL; UFSC; e ERA5) concluíram que com/sem batimetria há grandes índices eólicos a favor do Brasil, ou seja, acima de 7 m/s requeridos em distâncias dentro do necessário para que seja explorada a capacidade eólica dentro dos limites que o Direito Marítimo Internacional permite ao Brasil explorar (EPE, 2019). Durante o ciclo de vida de uma usina eólica *offshore* deve-se planejar pontos como: (i) impactos ambientais da instalação; (ii) operação e manutenção (O&M); e (iii) descomissionamento de tecnologias eólicas *offshore*, é essencial desde a fase de Pré-Desenvolvimento à fase de Pós-Operação (HERNANDEZ *et al.*, 2021).

Figura 5.5: Ciclo de Vida de uma Usina Eólica *Offshore*



Fonte: CRIAÇÃO, 2018.

Nota-se para o caso brasileiro que há presença da indústria de *O&G* nas regiões sudeste e nordeste (*hotspots* em ambos os setores) do litoral, o que pode significar um fator

crítico para o desenvolvimento de projetos eólicos *offshore* no Brasil devido aos potenciais conflitos ou restrições entre ambas indústrias (EPE, 2020; HERNANDEZ *et al.*, 2021). Dessa maneira, a implantação do sistema eólico deve, antes de seu início, ser submetido a autoridades envolvidas em seu ciclo de vida. A **Tabela 5.1** demonstra os órgãos e entidades mais importantes envolvidos (ou *stakeholders*, em inglês) no ciclo de vida das usinas eólicas *offshore* no Brasil.

Tabela 5.1: Principais órgãos/entidades envolvidas no ciclo de vida das usinas eólicas *offshore*¹⁸

| ENTIDADE/ÓRGÃO | SIGLA |
|--|--------|
| Ministério de Minas e Energia | MME |
| Agência Nacional de Energia Elétrica | ANEEL |
| Empresa de Pesquisa Energética | EPE |
| Operador Nacional do Sistema Elétrico | ONS |
| Conselho Nacional de Política Energética | CNPE |
| Câmara de Comercialização de Energia Elétrica | CCEE |
| Ministério do Meio Ambiente | MMA |
| Conselho Nacional do Meio Ambiente | CONAMA |
| Instituto Chico Mendes de Conservação e Biodiversidade | ICMBio |
| Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional | IPHAN |
| Agência Nacional de Aviação Civil | ANAC |
| Comando da Aeronáutica | COMAER |
| Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis | IBAMA |
| Secretaria de Patrimônio da União | SPU/ME |
| Agência Nacional de Transportes Aquaviários | ANTAQ |
| Marinha do Brasil | MB |
| Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social | BNDES |
| Secretaria Especial de Aquicultura e Pesca | SEAP |

Fonte: EPE, 2018; CRIAÇÃO, 2018

¹⁸ em alguns casos o processo poderá envolver outras instituições, tais quais: Fundação Nacional do Índio (FUNAI), Fundação Cultural Palmares (FCP), entre outras.

Nesse sentido, de acordo com a ABEMAR (2019) seria fundamental uma capacidade de ao menos 15 ton/m² para manuseio de cargas, o que está distante de ser atingido por portos brasileiros; além disso o país não possui embarcações para construir usinas eólicas *offshore* demoninadas *jack-ups*. Vale lembrar que apesar de ser geração de energia renovável, estudos de Energia Eólica *Offshore* devem-se para efeitos de previsão, ser pontuados também alguns impactos que podem ser gerados tais quais: ruídos subaquáticos, visuais, prejuízos à fauna e flora, conflitos com rotas de navegação, bens culturais e turismo; observa-se que a sazonalidade dos recursos biológicos (por exemplo, as aves migratórias, mamíferos marinhos ou tubarões) e o tempo de duração da atividade são os principais fatores para prevenir ou mitigar os impactos ambientais. No caso ambiental, a geração de energia, que ocorre durante a fase de operação e dura cerca de 20 a 25 anos, pode causar impactos negativos como mortalidade de aves ou diminuição do tamanho da população (pela rotação das pás), principalmente quando o parque eólico está localizado em suas rotas migratórias (HERNANDEZ *et al.*, 2021).

Outra fase importante no ciclo de vida, principalmente no que tange o setor sustentável é a fase de descomissionamento, ou seja, o estágio em que todos os componentes do parque eólico são removidos; a importância do descomissionamento é de dar sustentabilidade à implantação de uma usina eólica *offshore*, uma vez que o mesmo garante a restauração do meio ambiente ou compensação para impactos não mitigáveis. Geralmente, existem duas opções para o descomissionamento: (i) remoção completa; e (ii) parcial, em que certos componentes são deixados intencionalmente. Dessa maneira, a fase de descomissionamento possui três etapas principais: (a) o planejamento de descomissionamento para especificar as operações a serem realizadas, incluindo o tempo e o custo de cada operação; (b) a remoção das estruturas; e (c) o monitoramento da recuperação do local e do destino para onde vão os componentes do parque eólico (EPE 2020; HERNANDEZ *et al.*, 2021; BARBOSA, 2018).

A conexão ao sistema na integração de usinas eólicas *offshore* à rede elétrica pode se dar em corrente alternada ou contínua (a depender do caso) e a adoção dessas tecnologias de transmissão depende das características técnicas dos empreendimentos, em especial, da distância em relação à costa. Vale mencionar que, no contexto do atual arcabouço jurídico-regulatório algumas matérias que merecerão atenção de legislador e reguladores: (i) especificação do regime de uso do espaço marítimo destinado à exploração dos potenciais *offshore* por meio do qual sejam estabelecidas diretrizes e regras objetivas para seleção de

interessados; (ii) previsão de cláusulas específicas, no instrumento de outorga do uso do espaço marítimo, acerca do objeto, prazo, possibilidades de prorrogação, consequências do inadimplemento, descomissionamento, cessão de posição contratual, entre outros; e (iii) adoção de critérios para o cálculo do lance para o uso do espaço marítimo, na hipótese de presença de pluralidade de interessados em regime de competitividade (EPE, 2020; BARBOSA, 2018).

Os custos de implantação e de operação dos parques eólicos *offshore* estão - apesar de reservadas incertezas e particularidades - elevados quando comparadas às outras fontes energéticas já desenvolvidas no país (EPE, 2020), sendo este o principal motivo para os baixos índices de investimentos no setor eólico *offshore* brasileiro. Os sistemas de armazenamento devem ser usados para suavizar a flutuação de energia induzida pela intermitência do vento para garantir a estabilidade da rede. Além disso, a capacidade da rede local pode limitar a energia eólica *offshore* extraível. Esses desafios podem levar a custos mais elevados, afetando a viabilidade econômica do projeto (ASSIS TAVARES et al., 2019). Dessa forma, quanto aos aspectos tecnológicos da fonte eólica *offshore* (conforme visto na Seção 2), é identificada uma tendência de utilização de turbinas eólicas de grandes dimensões, com potências nominais mais elevadas e que demandam uma maior atenção na escolha do tipo de fundação, e de escalas maiores de projetos, características que a diferenciam em relação a fonte eólica *onshore* (EPE, 2020).

Dessa maneira, o desenvolvimento da energia eólica *offshore* é importante também para efetivar o Poder Marítimo Brasileiro, que de acordo com MAHAN (1890) é influenciado por seis elementos: (i) a posição geográfica, o Brasil é um país de posição estratégica, para o setor de energia não é diferente, há três *hotspots* em sua costa litorânea; (ii) a conformação física, que pode ser relacionada à quantidade e profundidade dos portos que devem possuir estruturas *ad hoc*; (iii) a extensão do território, segundo Mahan o comprimento da linha costeira e condição portuária são mais importantes que a extensão total em milhas quadradas existentes no país, que para o caso brasileiro pode ser exemplificado pela “Amazônia Azul”; (iv) tamanho da população; (v) o caráter nacional; e (vi) o caráter do governo, as características de perseverança, objetividade e determinação dos diversos governos indicam sucessos ou fracassos na história de qualquer nação (ALMEIDA, 2010; MAHAN, 1890).

As perspectivas de competitividade para projetos dessa fonte estão ligadas à diminuição de custos associados à aquisição de equipamentos, com destaque para as turbinas

eólicas, às fundações, aos ativos de transmissão, entre outros; esse é um mercado que vem crescendo internacionalmente, ganhando em escala, aprendizado e inovação, o que vem levando a um crescente interesse no desenvolvimento de projetos no Brasil – por esse motivo é notório o interesse em migrar o modelo de negócio das empresas de mercados próximos ao setor (EPE, 2020). Podemos refletir em melhores soluções para que o Brasil possa aproveitar de melhor maneira as Energias Renováveis no Mar seja elaborando políticas direcionadas aos investimentos em Gerações Eólicas *Offshore* quanto planejando a diversificação da sua matriz, de maneira que se possa haver melhor adaptação ao momento de transição energética global para o futuro com a descarbonização e a eletrificação do sistema para maior destaque não somente em sustentabilidade, mas em empoderamento de energia, uma vez que o Potencial Eólico *Offshore* do Brasil é muito grande.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se apontar que não há como afirmar se a Agenda 2030 e Acordo de Paris garantirão o alcance das propostas conforme estudos já descrevem alguns sinais críticos de não cumprimento das suas respectivas metas (apesar de o Brasil estar bem inserido entre os países engajados nessa iniciativa, há bastante a se desenvolver).

Entretanto, há certa preocupação da maioria das lideranças globais em Energias Renováveis na colaboração com as metas e objetivos e diminuição dos custos de geração – haja vista a proximidade do estágio comercial de algumas tecnologias oceânicas e operacional de barragens de marés, por exemplo.

A participação de países desenvolvidos na tecnologia de Energia Oceânica e *Offshore* pode ser explicada por dois motivos: (i) o alto grau de investimentos em aproveitamento de potencial do mar como fonte de energia; e (ii) constante esforço de países avançados nessas tecnologias em tentar reduzir altos índices de carbono emitidos por suas respectivas indústrias e seus impactos à sustentabilidade, que até os dias atuais são motivos de preocupação para diversas autoridades no cumprimento de diversos Acordos e Agendas Globais. Além disso, destaca-se que, em alguns casos, a inexistência de fontes alternativas leva à maior necessidade de pesquisa e desenvolvimento (P&D) de energias no/do mar.

Nesse sentido, há grande competitividade no desenvolvimento dessas tecnologias para atender demandas locais, regionais e nacionais; *market share* limitado a poucas empresas, originárias majoritariamente dos continentes europeu e asiático; e boa receptividade de maneira geral aos Projetos de Energias Renováveis, uma vez que atualmente os projetos são efetivados por países de quase todos os continentes.

Verifica-se que existe, de maneira geral, a necessidade da implementação de infraestruturas locais para atender às demandas das instalações, fato que dependerá inicialmente da motivação dos governos na viabilização dos requisitos necessários cumprindo as normas e padrões de prática internacionais. Além dos pontos citados, é importante a regulamentação de agências de fiscalização local de setores direta e indiretamente ligados aos setores mencionados, por exemplo: Energia Eólica *Offshore*, na qual o Brasil ainda não se desenvolveu, necessitando de buscar o uso de experiências dos mercados próximos (nesse

caso o mercado *Oil & Gas*); marco regulatório e respaldo do governo para que os processos licitatórios e de concorrência possam ter início (em destaque aos leilões, uma vez que são o meio mais econômico de se implementar as políticas energéticas renováveis, conforme praticado em outros setores, por exemplo: *O&G* e Eólica *Onshore*).

No Brasil, não há tradição em cultura marítima para diversos aspectos: pesca, transporte marítimo, navegação, logística; com as energias renováveis no/do Mar não é diferente, sendo as mesmas pouco fomentadas historicamente pelos governos. Portanto, o Brasil deve aproveitar o seu potencial marítimo e dar prioridade à condução aos processos de transição estrategicamente, estruturando o planejamento energético, aproveitando as experiências em águas profundas para aproveitar melhor os recursos eólicos *offshore* e atraindo investimentos para mercados renováveis do mar. Dessa maneira, estará, necessariamente, consolidando o próprio conceito de Economia do Mar e de Poder Marítimo no país.

A experiência brasileira em áreas *offshore* é conhecida mundialmente, especialmente nas águas profundas, a indústria e cadeia produtiva já existentes devem se adaptar à indústria eólica *offshore*. A Transferência de Tecnologia poderá ser efetivada junto a países desenvolvidos, uma vez que possuímos recursos como hidrelétricas e gás natural para sustentarem o processo de Transição Energética, o Brasil atualmente possui excelentes recursos para ambas as modalidades citadas, reformulando de maneira gradual e sustentável sua Matriz de Energia. Sendo assim, desenvolver a exploração de Energias Renováveis no/do Mar está entre as soluções mais adequadas para atender não somente às demandas de energia, mas outras, por exemplo: econômica, social, sustentável, política, ambiental; se a política e os investimentos forem efetivados de maneira inteligente e estratégica, o Brasil poderá usar de todos os recursos que a natureza lhe proporciona para o bem e avanço da sua sociedade.

REFERÊNCIAS

- 4COFFSHORE. **Offshore Wind Farms**. Disponível em: <<https://www.4coffshore.com/windfarms>>. Acesso em: 20 Mar. 2021.
- ABREU, Y. V.; OLIVEIRA, M. A. G.; GUERRA, S. M. G. **Energia, Economia e Rotas Tecnológicas**. Textos selecionados. Palmas, 2010. Disponível em: <<http://www.biblioises.com.ar/Contenido/300/330/a%20libro%20completo%20energia%20economica.pdf>> Acesso em: 01 jun. 2020.
- ADESANYA, A.; MISRA, S.; MASKELIUNAS, R.; DAMASEVICIUS, R. Prospects of ocean-based renewable energy for West Africa's sustainable energy future. **Smart and Sustainable Built Environment**, 2020.
- ALMEIDA, F. E. A. Alfred Thayer Mahan - Os elementos do poder marítimo, **Revista Marítima Brasileira**, Rio de Janeiro, v.130, n. 01/03, jan./mar. 2010a.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **“Hidroeletricidade”**. Brasília: ANA, 2016. Disponível em: <<https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/metadata.show?id=389&currTab=simple>> Acesso em: 27 jun. 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2005. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br>> Acesso em: 10 jun. 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2008. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br>> Acesso em: 10 jun. 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **“Glossário”**. Brasília: Aneel, 2020. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>> Acesso em: 11 jun. 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **“Sala de Imprensa: ANEEL fomenta o investimento em inovação no setor elétrico brasileiro”**. Brasília: Aneel, 2019. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>> Acesso em: 09 jun. 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **“Brasil ultrapassa marca de 1GW em geração distribuída”**. Brasília: Aneel, 2019a. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>> Acesso em: 09 jun. 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **“PROFINFA”**. Brasília: Aneel, 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/proinfa>> Acesso em: 28 jun. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO – ANP. “**Movimentação, estocagem e comercialização de gás natural**”. Brasília: ANP, 2020. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>> Acesso em: 15 jun. 2020.

AGÊNCIA DO SENADO. **Projeto regulamenta exploração de usinas elétricas no mar**. Brasília: ACN, 2021. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2021/03/10/projeto-regulamenta-exploracao-de-usinas-eletricas-no-mar>> Acesso em: 21 Fev. 2020.

ANG, B. W.; CHOONG, W. L.; NG, T. S. Energy security: Definitions, dimensions and indexes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 1077–1093, 2015.

AQUILA, G.; PAMPLONA, E. O.; QUEIROZ, A. R.; ROTELA JUNIOR, P.; FONSECA, M. N. An overview of incentive policies for the expansion of renewable energy generation in electricity power systems and the Brazilian experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p.1090–1098, 2017.

ARENT, Douglas; ARNDT, Channing; MILLER, Mackay; TARP, Finn; ZINAMAN, Owen. **The Political Economy of Clean Energy Transitions**. Oxford: Oxford University Press, 2017.

ARSHAD, Muhammad. Global status of wind power generation: theory, practice, and challenges. **International Journal of Green Energy**, v.16, n.14, p.1073-1090, 2019.

ASSIS TAVARES, L.F.; SHADMAN, M.; DE FREITAS ASSAD, L.P.; SILVA, C.; LANDAU, L.; ESTEFEN, S.F.; Assessment of the offshore wind technical potential for the Brazilian Southeast and South regions. **Energy**, v. 196, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA - ABEEÓLICA. **Boletim Anual de Energia Eólica 2019**. São Paulo: ABEEólica, 2020. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2020/06/Boletim-Anual-de-Gera%C3%A7%C3%A3o-2019v.pdf>> Acesso em: 15 jun. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA SOLAR - ABSOLAR. **Brasil alcança 1 GW em microgeração solar fotovoltaica**. São Paulo: ABEEólica, 2020. Disponível em: <<http://absolar.org.br/noticia/noticias-externas/brasil-alcanca-1-gw-em-microgeracao-solar-fotovoltaica.html>> Acesso em: 28 jun. 2020.

AZZUNI, A.; BREYER, C. Definitions and dimensions of energy security: a literature review. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment**. 268ed., v. 7, n. 7, p-1-34, 2017.

BANCO MUNDIAL - BM. Data: Brazil. Disponível em: <<https://data.worldbank.org/country/brazil?locale=pt>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SOCIAL - BNDES. **A energia solar no Brasil.** 2018. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/energia-solar>>. Acesso em: 28 jun. 2020.

BARBOSA, Robson. **Inserção da energia eólica offshore no Brasil:** análise de princípios e experiências regulatórias. 2018. 281f. Tese de Doutorado em Ciência, Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2018.

BARCLAY, Christopher. **Wind farms consents:** offshore. United Kingdom: House Commons Library, 2012. Disponível em: <<http://researchbriefings.files.parliament.uk/documents/SN05088/SN05088.pdf>>. Acesso em: 18 Jan. 2021.

BEIRÃO, A. P.; MARQUES, M.; RUSCHEL, R. R. **O Valor do Mar:** uma visão integrada dos recursos do oceano do Brasil. São Paulo: Essential Idea Editora, 2018.

BEAUDOIN, G.; ROBERTSON, D.; DOHERTY, R.; CORREN, D.; STABY B.; MEYER L.. Technological challenges to commercial-scale application of marine renewables. **Oceanography**, v. 23, n. 2, p. 32-41, 2010.

BELGIAN OFFSHORE PLATFORM – BOP. **Belgian offshore platform.** 2021. Disponível em: <<https://www.belgianoffshoreplatform.be/en/>>. Acesso em: 20 Jan. 2021.

BELTRAME B; NETO J. O papel da Aneel na regulação do setor elétrico brasileiro. **Cad. Esc. Dir. Rel. Int.**, v.27, n.1, p.1-19, 2017.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Infraestrutura – Em 2016, biomassa é a segunda maior fonte de energia.** 2017. Disponível em: <www.brasil.gov.br>. Acesso em: 23 jun. 2020.

BUNDESVERBAND WINDENERGIE – BWE. **Wind Energie.** Disponível em: <<https://www.wind-energie.de/english>>. Acesso em: 17 Mar. 2021.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - CCEE. **Entenda mercado.** 2020. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/como-participar/participe/entenda_mercado>. Acesso em: 03 jun. 2020.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - CCEE. **Com quem se relaciona.** 2020a. Disponível em:

<http://https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/com_quem_se_relaciona_afrLoop=620609736847027&_adf.ctrlstate=145au37df_75#!%40%40%3F_afrLoop%3D620609736847027%26_afr.ctrl-state%3D145au37df_79>.

Acesso em: 13 jun. 2020.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - CCEE. **Tipos e fontes de energia.** 2020b. Disponível em:

<https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes>. Acesso em: 20 jun. 2020.

CARLÃO, R. **Projecto de um ciclo de Rankine Orgânico para produção de 200kWe.** Mestrado de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2010.

CARRIZO, S.; NÚÑEZ, M.; GIL, S. Transiciones energéticas en la Argentina. **Ciencia Hoy**, n. 147, p. 24–29, 2016. Disponível em: <http://cienciahoy.org.ar/2016/01/transiciones-energeticas-en-la-argentina/>. Acesso em: 11 abr. 2020.

CARVALHO, A. B. 2018. 185f. **Economia do Mar: Conceito, valor e importância para o Brasil.** Tese de Doutorado, PPGED-PUCRS, 2018.

CASTRO, N.; LIMA, A.; HIDD, G.; VARDIERO, P. **“Perspectivas da Energia Eólica offshore”.** Agência Canal Energia. Rio de Janeiro, Ago. 2018.

CASTRO, N.; DANTAS, G. (Org.). **Políticas Públicas para Redes Inteligentes.** Rio de Janeiro: Publit Soluções Editoriais, 2016.

CASTRO, N.; BRANDÃO, R.; HUBNER, N.; DANTAS, G.; ROSENTAL, R. Considerações sobre a ampliação da geração complementar ao parque hidroelétrico do Brasil. **TDSE -Texto de Discussão do Setor Elétrico**, n. 62, Rio de Janeiro: GESEL-UFRJ, 2014.

CAZZANIGA, R.; CICU, M.; ROSA-CLOT, M.; ROSA-CLOT, P.; TINA, G. M.; VENTURA, C. Floating photovoltaic plants: Performance analysis and design solutions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1730–1741, 2018.

CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA – CBIE. **Caminhos da energia. 2019.** 2019. Disponível em: <<https://cbie.com.br/espaco-do-adriano/caminhos-da-energia-escreve-adriano-pires/>>. Acesso em: 18 jun. 2020.

CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA – CBIE. **Como a Biomassa se transforma em Energia Elétrica?.** 2019a. Disponível em:

<<https://cbie.com.br/artigos/como-a-biomassa-se-transforma-em-energia-eletrica/>>. Acesso em: 18 jun. 2020.

CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA - CBIE. **O que é Matriz Energética?**. 2020. Disponível em: <<https://cbie.com.br/artigos/o-que-e-matriz-energetica/>>. Acesso em: 18 jun. 2020.

CENTRO DE GESTÃO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE. **Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica**: Documento executivo. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, v.1, 2017.

COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO – CHESF. **Chesf energiza Usina Solar Flutuante**. 04 de Agosto de 2019. Disponível em: <https://www.chesf.gov.br/_layouts/15/Chesf_Noticias_Farm/Noticia.aspxIDNoticia=373>. Acesso em: 18 abril 2020.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ – CPFL. **Características dos sistemas elétricos e do setor elétrico de países e/ou estados selecionados**. Out. 2014. Disponível em: <<https://www.cpfl.com.br/energias-sustentaveis/inovacao/projetos/Documents/PB3002/caracteristicas-de-sistemas-eletricos-de-paises-selecionados.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2020.

CRIAÇÃO UFRN – Research Group: Creativity and Innovation of Products and Processes – Renewable Energy of Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN). **Regulamentação Para O Desenvolvimento do Mercado Eólico Offshore Do Brasil**. Disponível em: <www.criacao.ufrn.br>. Acesso em: 21 Mar. 2021.

DANTAS, S.G.; POMPERMAYER, F. M. Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeitos no setor elétrico. **Texto para Discussão**: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Rio de Janeiro: IPEA, 2018.

DE CASTRO, M.; SALVADOR, S.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; COSTOYA, X., CARVALHO, D.; SANZ-LARRUGA, F. J.; GIMENO, L. Europe, China and the United States: Three different approaches to the development of offshore wind energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n.109, p. 55–70. 2019.

DÍAZ, H.; GUEDES SOARES, C. Review of the current status, technology and future trends of offshore wind farms. **Ocean Engineering**, v. 209. 2020.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION – EIA. **“Hydropower explained - Tidal power”**. Disponível em: <<https://www.eia.gov/energyexplained/hydropower/tidal-power.php>>. Acesso em: 18 abr. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Roadmap Eólica Offshore Brasil: Caminhos e Perspectivas**. EPE. Rio de Janeiro, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco Energético Nacional**. Brasília: EPE, Brasil, 2020a. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>>. Acesso em: 04 jun. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **ABC da Energia**. Brasília: EPE, Brasil, 2020a. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 04 jun. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Brasília: EPE, Brasil, 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2027**. Brasília: EPE, Brasil, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Sistemas isolados: planejamento do atendimento aos sistemas isolados horizonte 2023**. Brasília: EPE, 2018a.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Roadmap Eólica Offshore 2035**. Brasília: EPE, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco Energético Nacional**. Brasília: EPE, Brasil, 2019a. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>. Acesso em: 14 jun. 2019.

ESTEBAN, M. D.; DIEZ, J. J.; LÓPEZ, J. S.; NEGRO, V. Why offshore wind energy? **Renewable Energy**, n. 36, p. 444–450, 2011.

FELDMANN, P. M. **OS Desafios da Instalação de Eólicas Offshore no Brasil**. 2018. Disponível em: <<https://www.machadomeyer.com.br/pt/inteligencia-juridica/publicacoes-ij/ambiental/os-desafios-da-instalacao-de-eolicas-offshore-no-brasil>>. Acesso em: 30 Abr. 2021.

FENG Y.; TAVNER P.J.; LONG H; BIALEK J.W. Review of early operation of UK Round 1 offshore wind farms. In: Proceedings of the power and energy society general meeting, **IEEE** p.25-29, Minneapolis, 2010.

GALHARDO, C. R. Os desafios para implantação de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil. **PCH Notícias & SHP News**, n. 55, p. 32, 2012. Disponível em: <http://www.cerpch.unifei.edu.br/exibir_rev.php?id=55>. Acesso em: 5 Jun. 2020.

GEELS, F. W.; BERKHOUT, F.; VAN VUUREN, D. P. Bridging analytical approaches for low-carbon transitions. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 6, p. 576–583, 2016.

GENDT, Shari de. **Legal challenges concerning offshore wind installations along the coastline of the North Sea Shari De Gendt**. 2018. 113f. Master of Science in Maritime Science. Universiteit Gent, Belgium, 2018.

GIELEN, D.; BOSHELL, F.; SAYGIN, D.; BAZILIAN, M. D.; WAGNER, N.; GORINI, R. The role of renewable energy in the global energy transformation. **Energy Strategy Reviews**, n. 24, p. 38–50, 2019.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). **Annual market update 2017**. Global Wind Report. GWEC, 2018.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). **Annual market update 2020**. Global Wind Report. GWEC, 2020.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). **Annual market update 2021**. Global Wind Report. GWEC, 2021.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, n. 72, p. 6-15, 2007.

GOVERNMENT OF THE NETHERLANDS. **Offshore wind energy**. 2021. Disponível em: <<https://www.government.nl/topics/renewable-energy/offshore-wind-energy>>. Acesso em: 03 Mar. 2021.

GOVERNMENT OF UNITED KINGDOM. **Department for Business, Energy and Strategy**. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.uk/government/organisations>>. Acesso em: 30 Mar. 2021.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**, v.1. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

HANNON, M; TOPHAM, E; MACMILLAN, D; DIXON J.; COLLU, M. Offshore wind, ready to float? **Global and UK trends in the floating offshore wind market**. Glasgow, 2019.

HERNANDEZ, O. M. C.; SHADMAN, M.; AMIRI, M. M.; SILVA, C.; ESTEFEN, S. F.; LA ROVERE, E. **Environmental impacts of offshore wind installation, operation and maintenance, and decommissioning activities: A case study of Brazil**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 144, 2021.

- HIGGINS, P.; FOLEY, A. The evolution of offshore wind power in the United Kingdom. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.37, p.599–612. 2014.
- IBERDROLA. “**Sabe como os parques eólicos offshore funcionam?**”. 2021. Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/meio-ambiente/como-funcionam-os-parques-eolicos-offshore>> Acesso em: 08 Mar. 2021.
- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA. **Brasil 2035: cenários para o desenvolvimento**. Brasília : Ipea/Assecor, 2017.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Atlas of energy**. Paris: IEA, 2017.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **China’s net-zero ambitions: the next Five-Year Plan will be critical for an accelerated energy transition**. Paris: IEA, 2020a.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Committed to a secure and sustainable energy future for all**. Paris: IEA, 2019a.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Electricity generation mix in Brazil: 1 Jan - 19 Oct, 2019 and 2020**. Paris.: IEA, 2020b.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. “**Energy Security**” **IEA Energy Technology Systems Analysis Programme**. Paris: IEA, 2014.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Global Energy and CO2 Status Report 2017**. Paris: IEA, 2018.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **World Energy Outlook 2019: The gold standard of energy analysis**. Paris: OECD/IEA, 2019.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA. **Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition)**. Abu Dhabi: IRENA, 2019.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA. **Nurturing offshore wind markets: Good practices for international standardisation**, International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi: IRENA, 2018.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA. **Synergies between renewable energy and energy efficiency, a working paper based on Remap**. Abu Dhabi: IRENA, 2018a.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA. **UN Ocean Conference**. New York: IRENA, 2017.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA. **Technology Brief: Wave Energy**. Abu Dhabi: IRENA, 2014.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA. **Technology Brief: Ocean Thermal Energy Conversion**. Abu Dhabi: IRENA, 2014a.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA. **Ocean Energy Technology Readiness, Patents, Deployment Status and Outlook**. Abu Dhabi: IRENA, 2014b.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA. **Technology Brief: Salinity Gradient Energy**. Abu Dhabi: IRENA, 2014c.

KO, D.H.; CHUNG, J.; LEE, K.-S.; PARK, J.-S.; YI, J.-H. Current Policy and Technology for Tidal Current Energy in Korea. **Energies**, v. 12, n. 9, p. 1-15, 2019.

KREISS, Jan; EHRHART, Karl-Martin; HAUFE, Marie-Christin. Appropriate design of auctions for renewable energy support e prequalifications and penalties. **Energy Policy**, v.101, p.512-520. 2017.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. Ed. 5. São Paulo: Atlas, 2003.

LAMB, J. S.; NEWSTEAD, D. J.; KOCZUR, L. M.; BALLARD, B. M.; GREEN, M. C.; JODICE, P. G. R. A bridge between oceans: overland migration of marine birds in a wind energy corridor. **Journal of Avian Biology**, v. 49, n. 2, 2018.

LAUBER, V.; JACOBSSON, S. The politics and economics of constructing, contesting and restricting socio-political space for renewables – **The German Renewable Energy Act. Environmental Innovation and Societal Transitions**, v.18, p.147–163. 2016.

LEITE, M.V.C. (Org.). **Alternativas para o desenvolvimento brasileiro: novos horizontes para a mudança estrutural com igualdade**. Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL): Santiago, 2019.

LEITE, N.; DELGADO, M.A.P.; EL HAGE, F. S. Os desafios do armazenamento de energia no setor elétrico. **Boletim Energético: FGV Energia**, n. 1, p. 9-12, 2017.

LEME, A. A. A Reforma do Setor Elétrico no Brasil, Argentina e México: contrastes e perspectivas em debate. **Revista de Sociologia Política**, v. 27, n. 33, p. 97-121, 2009.

LEWIS, A.; ESTEFEN, S.; HUCKERBY, J.; LEE, K.S.; MUSIAL, W.; PONTES, T.; TORRES-MARTINEZ, J. Ocean energy. In: EDENHOFER, O.; PICHES-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; SEYBOTH, K.; MATSCHOSS, P.; KADNER, S.; ZWICKEL, T.; EICKEMEIE, P.; HANSEN, G.; SCHLÖMER, S.; VON STECHOW. **IPCC Special Report**

- on **Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**. Cambridge-NY: Cambridge University Press, 2011.
- MACHADO, Jéferson Prietsch. **Response of the oceanic and atmospheric circulations associated with the weakening of global thermohaline circulation**. 2009. 80 f. Dissertação de Mestrado em Agrometeorologia. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.
- MAHAN, Alfred T. **The Influence of Sea Power Upon History, 1660-1783**. Boston: Little, Brown, and Company, 1890.
- MAIDANA, A. P. D. F.; BOGGI, C. L. E. B. Descarbonização: relevância ambiental e aspectos tributários. **Diritto & Diritti**, v. 1, p. 1-28, 2009.
- MARAFON, A.C.; SANTIAGO, A.D.; AMARAL, A.F.C.; BIERHALS, A.N.; PAIVA, H.L.; GUIMARÃES, V.S. Uso da biomassa para a geração de energia. **Embrapa Tabuleiros Costeiros**. Aracajú: Embrapa, 2016.
- MARINHA DO BRASIL. “**O que é Amazônia Azul e por que o Brasil quer se tornar potência militar no Atlântico**”. 2019. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/economia-azul/noticias/o-que-%C3%A9-amaz%C3%B4nia-azul-e-por-que-o-brasil-quer-se-tornar-pot%C3%Aancia-militar-no-atl%C3%A2ntico>> Acesso em: 07 Mar. 2021.
- MYSZCZUK A.; SOUZA A. O Setor Elétrico Brasileiro e Alguns Conflitos Entre as Políticas Públicas de Proteção ao Meio Ambiente e de Desenvolvimento Econômico. **Desenvolvimento Em Questão**, v. 16, n. 43, p. 200-233, 2018.
- MANAGEMENT UNIT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE NORTH SEA. (MUMM). **Offshore wind farms in Belgium**. Royal Belgian Institute of Natural Sciences. Scientific Service Management Unit of the Mathematical Model of the North Sea. Management of the Marine Environment. Disponível em: <<https://odnature.naturalsciences.be/mumm/en/windfarms>>. Acesso em: 23 Mar. 2021.
- NASCIMENTO, R. L. **Energia Solar no Brasil: Situação e Perspectivas**. Brasília: Câmara dos Deputados, 2017.
- NETHERLANDS ENTERPRISE AGENCY – NEA. **Renewable Energy**. 2015. Disponível em: <<https://www.government.nl/topics/renewable-energy>>. Acesso em: 03 Jan. 2021
- NETO, A. G.; HIRON, L.; PIMENTA, F. M.; RODRIGUES, R. R. Northeast Brazil potential for land-based OTEC implementation. **Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)**, Mônaco, 2014.

NG, C.; RAN, L. **Offshore Wind Farms: Technologies, Design and Operation**. Woodhead Publishing, United Kingdom, 2016.

NOONAN, M.; T. STEHLY; D. MORA; L. KITZING; G. SMART; V. BERKHOUT; Y. KIKUCHI. **IEA Wind TCP Task 26: Offshore Wind International Comparative Analysis**, International Energy Agency Wind Technology Collaboration Programme, United States, 2018.

OFFICE OF GAS AND ELECTRICITY MARKETS – OFGEM. **Electricity**. London, United Kingdom, 2021.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. **Conhecimento: Glossário**. Brasília: ONS, 2020. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/conhecimento/glossario>>. Acesso em: 05 jun. 2020.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. **O que é o SIN: Sistema Interligado Nacional**. Brasília: ONS, 2020a.

POLIS, H. J., Dreyer, S. J., Jenkins, L. D. Public willingness to pay and policy preferences for tidal energy research and development: a study of households in Washington State. **Ecological Economics**, n. 136, p. 213–225, 2017.

PEREIRA FILHO, J. L.; COSTA, L. C. Mudança no setor elétrico. **Revista de Administração de Empresas**, São Paulo, v. 3, n. 2, p. 23-27, 2004.

PETROBRAS. **Estamos desenvolvendo o primeiro projeto piloto de energia eólica offshore do Brasil**. 2018. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/estamos-desenvolvendo-o-primeiro-projeto-piloto-de-energia-eolica-offshore-do-brasil.htm>>. Acesso em: 20 Ago. 2019.

PINTO, L.I.C.; MARTINS, F.R.; PEREIRA, E.B. O mercado brasileiro da energia eólica, impactos sociais e ambientais. **Rev. Ambient. Água**, Taubaté, v. 12, n. 6, p. 1082-1100, 2017.

PIRES, Adriano; FERNÁNDEZ, Eloi Fernández y; BUENO, Júlio Cesar Carmo (org.). **Política energética para o Brasil: propostas para o crescimento sustentável**. Nova Fronteira: Rio de Janeiro, 2006.

POUDINEH, Rahmatallah; FOLEY, Benjamin; BROWN, Craig. **Economics of Offshore Wind Power: Challenges and policy considerations**. Editora Palgrave, 2017.

- PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO – PNUD. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 2015**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/ods7/>>. Acesso em: 28 jan. 2020.
- PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO – PNUD. **Relatório do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento 2019**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/>>. Acesso em: 20 mar. 2020.
- REVO. **Revolution Wind**. 2021. Disponível em: <<https://revolution-wind.com/>>. Acesso em: 21 mar. 2021.
- RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY – REN21. **Renewables 2013 Global Status Report**. Paris: REN21, 2013.
- RENEWABLEUK. **Wind Energy**. RenewableUK. London, United Kingdom, 2021.
- ROGGE, K. S.; JOHNSTONE, P. Exploring the role of phase-out policies for low-carbon energy transitions. **The case of the German Energiewende**. *Energy Research & Social Science*, v.33, p.128–137. 2017.
- SABBATELLA; Ignacio; SANTOS, Thauan. The IPE of regional energy integration in South America. In: VIVARES, Ernesto (Ed.). **The Routledge Handbook to Global Political Economy: Conversations and Inquiries**. Cap. 42. Routledge, 2020.
- SACRAMENTO, E. M.; CARVALHO, P. C. M.; ARAÚJO, J. C.; RIFFEL D.B. Scenarios for use of floating photovoltaic plants in Brazilian reservoirs. **IET Renewable Power Generation**, v. 9, n. 8, p. 1019-1024, 2015.
- SANTOS, G. A. G. D.; BARBOSA, E.; SILVA, J. F.; ABREU, R. D. S. D. Por que as tarifas foram para os céus? Propostas para o Setor Elétrico Brasileiro. **Revista do BNDES**, v. 14, n. 29, p. 435-474, 2008.
- SANTOS, Thauan. Economia do Mar. In: ALMEIDA, Francisco E. Alves de; MOREIRA, William de Sousa. **Estudos Marítimos: visões e abordagens**. Rio de Janeiro: Editora Humanitas, p. 355-388, 2019.
- SANTOS, Thauan. **Regional Energy Security: Re-evaluating concepts and policies to promote energy integration in Mercosur**. Tese de Doutorado, PPE/COPPE/UFRJ, 2018.
- SCHLEUSSNER, C. F.; ROGELJ, J.; SCHAEFFER, M.; LISSNER, T.; LICKER, R.; FISCHER, E. M.; HARE, W. Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 9, p. 827-835, 2016.
- SELVAKKUMARAN, S.; LIMMEECHOKCHAI, B. Energy security and co-benefits of

energy efficiency improvement in three Asian countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 491–503, 2013.

SHADMAN, M.; SILVA, C.; FALLER, D.; WU, Z.; DE FREITAS ASSAD, L.P.; LANDAU, L.; LEVI, C.; ESTEFEN, S.F. Ocean Renewable Energy Potential, Technology, and Deployments: A Case Study of Brazil. **Energies**, v. 12, n. 19, p. 1-37, 2019.

SHAHBAZ, M.; SHAHZAD, S. J. H.; MAHALIK, M. K.; SADORSKY, P. How strong is the causal relationship between globalization and energy consumption in developed economies? A country-specific time-series and panel analysis. **Applied Economics**, v. 50, n. 13, p. 1479–1494, 2017.

SICSÚ J.; CASTELAR, A. (Org.). **Sociedade e economia: estratégias de crescimento e desenvolvimento**. Brasília: Ipea, 2009.

SILVA, J.J.V.G. **Produção de Energia por Osmose**. 2009. 67f. Tese de Mestrado, Universidade do Porto, 2009.

SILVA, AMANDA J.V.C. **Potencial Eólico Offshore no Brasil: Localização de Áreas Nobres através de Análise Multicritério**. 2019. 75f. Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro: 2019.

SOLEIMANI, K.; KETABDARI, M.J.; KHORASANI, F. Feasibility study on tidal and wave energy conversion in Iranian seas. **Sustain Energy Technol Assessments**, n. 11, p. 77–86, 2015

STEYN, H. J. The Concepts ‘Benchmarks and Benchmarking’ used in Education Planning: Teacher Education as example. Quality, Social Justice and Accountability in Education Worldwide. In: POPOV N.; WOLHUTER C.; ERMENC K.S.; HILTON G.; OGUNLEYE J.; NIEMCZYK E. Sofia: **BCES Conference Books**, p-80-88, 2015.

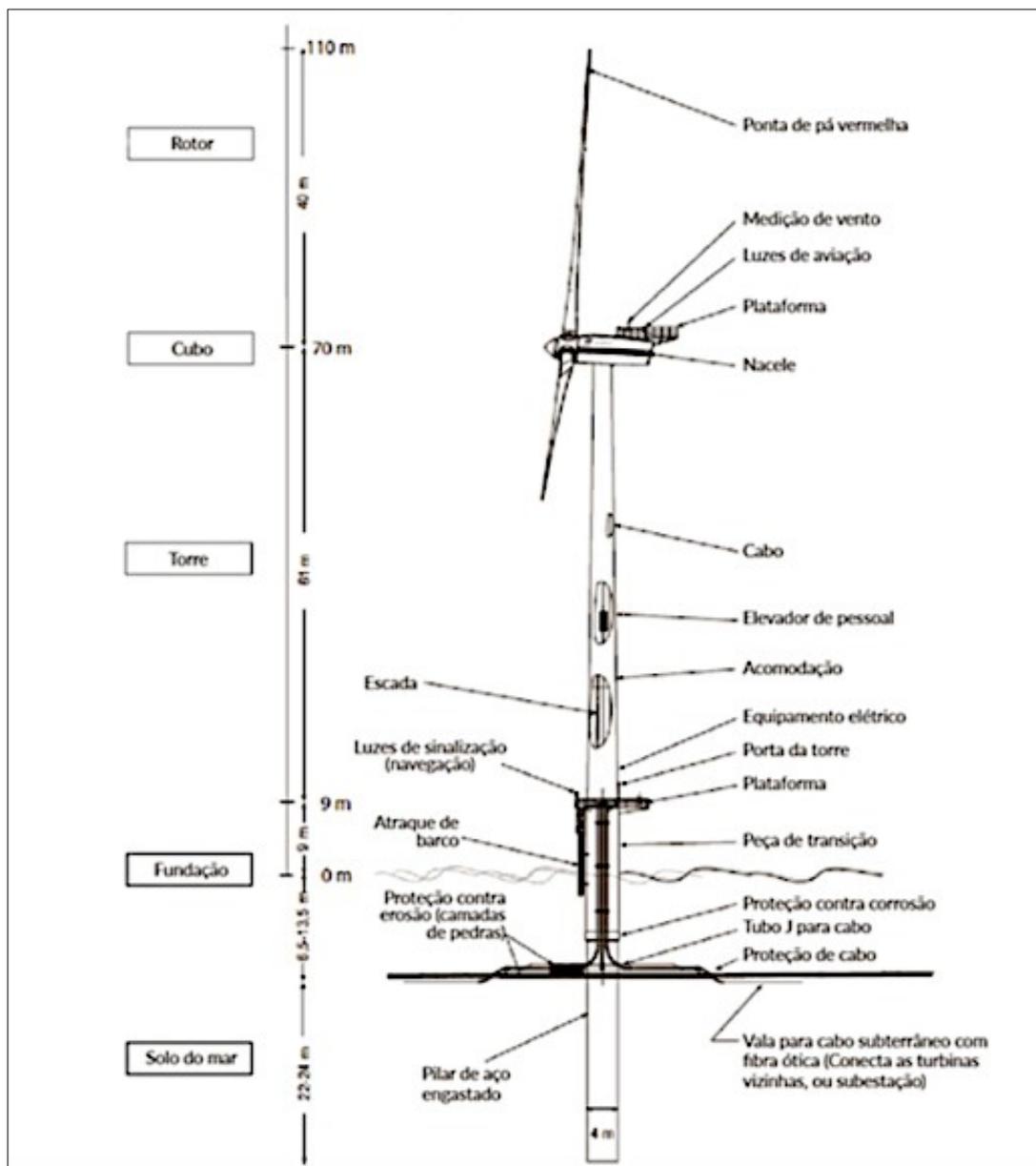
THE CROWN ESTATE. **Energy**. 2021. Disponível em: <<https://www.thecrownestate.co.uk/en-gb/what-we-do/on-the-seabed/energy/>>. Acesso em: 05 Abr. 2021.

TJIU, W.; MARNOTO, T.; MAT, S.; RUSLAN, M. H.; SOPIAN, K. Darrieus vertical axis wind turbine for power generation II: Challenges in HAWT and the opportunity of multi-megawatt Darrieus VAWT development. **Renewable Energy**, v. 75, p. 560–571, 2015.

TOPHAM, E.; MCMILLAN, D. Sustainable decommissioning of an offshore wind farm. **Renewable Energy**, v. 102, p. 470–480, 2017.

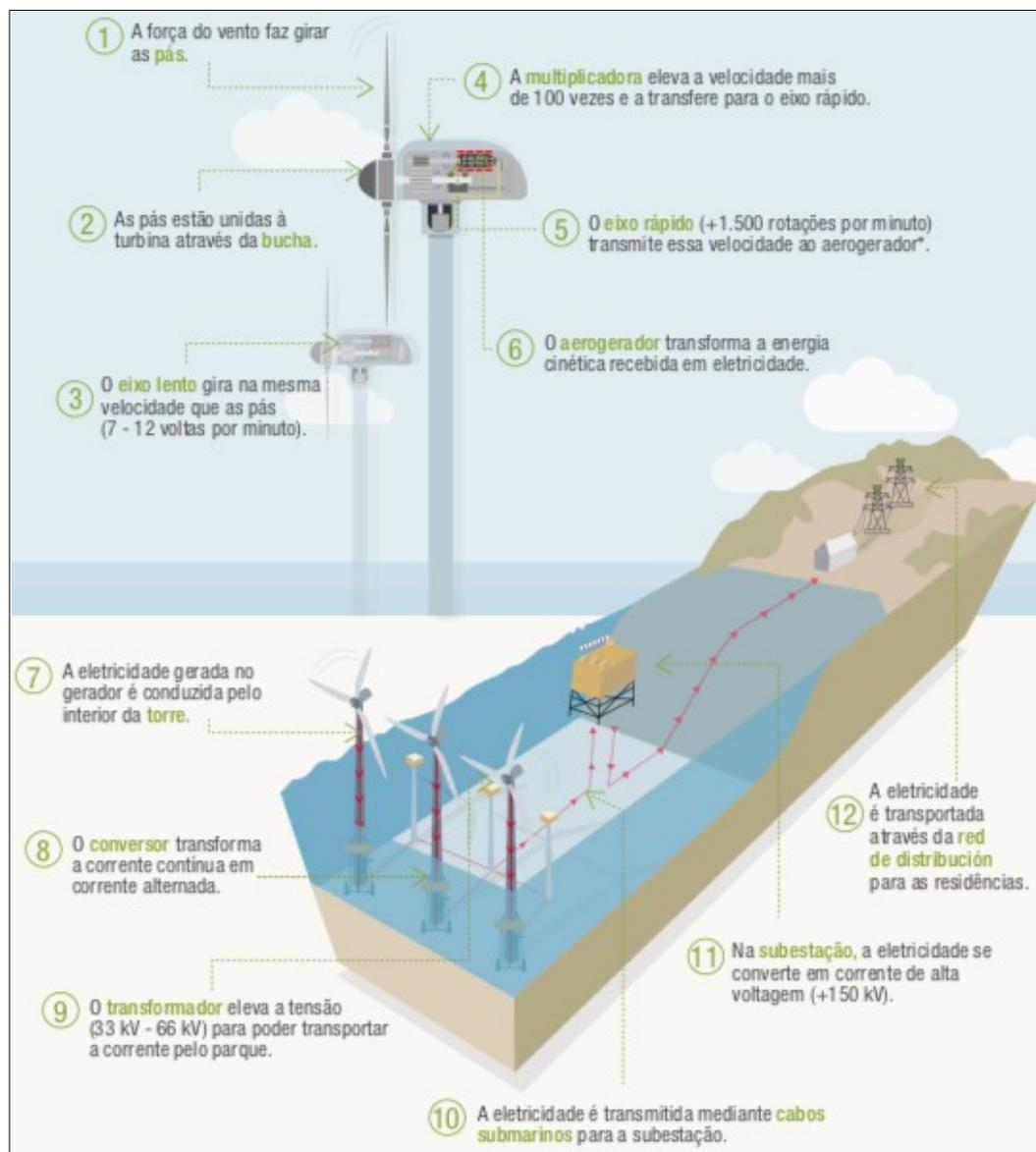
- VALDÉS LUCAS, J. N.; ESCRIBANO FRANCÉS, G.; SAN MARTÍN GONZÁLEZ, E. Energy security and renewable energy deployment in the EU: Liaisons Dangereuses or Virtuous Circle? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 1032–1046, 2016.
- VITERBO, Jean Carlos. **Geração de energia elétrica a partir da fonte eólica offshore na margem do Brasil**. 2008. 167f. Dissertação de Mestrado em Engenharia - Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.
- VON JOUANNE, A.; BREKKEN, T. K. A. Ocean and Geothermal Energy Systems. **Proceedings of the IEEE**, n. 11, p. 2147–2165, 2017.
- WALVIS, A.; GONÇALVES, E. D. L. **Avaliação das reformas recentes no setor elétrico brasileiro e sua relação com o desenvolvimento do mercado livre de energia**. FGV CERI, 2014.
- WILLIAMS, S.; DOYON, A. Justice in energy transitions. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, v. 31, p. 144-153, 2019.
- WIND EUROPE. **Offshore Wind in Europe: Key trends and statistics 2017**. Belgium: WindEurope, 2018.
- WIND EUROPE. **Offshore Wind in Europe: Key trends and statistics 2020**. Belgium: WindEurope, 2021.
- WIND POWER. **The Energy Database**. 2021. Disponível em: <<https://www.thewindpower.net/>>. Acesso em: 08 Abr. 2021.
- WORLD BANK GROUP, ESMAP, and SERIS. **Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report - Executive Summary**. Washington, DC: World Bank, 2018.
- WORLD ECONOMIC FORUM – WEF. **Fostering Effective Energy Transition 2019**. Switzerland: Cologny/Geneva, 2019.
- WORLD ENERGY COUNCIL – WEC. **Energy Efficiency: A Worldwide Review**. London: WEC, 2004.
- WORLD ENERGY COUNCIL – WEC. **World Energy Resources**. London, UK. 2017.
- YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e métodos - 2.ed**. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- YSTAD, Anders. **Policy recommendations for offshore wind**. Rio de Janeiro: Equinor New Energy Solutions, 2019.
- ZANELLA, Tiago V. **Manual de Direito do Mar**. Belo Horizonte: Editora D'Plácido, 2017.

ANEXO I - Principais componentes do conjunto aerogerador eólico *offshore*



Fonte: BARBOSA, 2018.

ANEXO II - Funcionamento do parque eólico *offshore*



Fonte: IBERDROLA, 2021