

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**ARTHUR SOLIGO GOMES
GABRIEL RIBEIRO BENEDITO**

**ANÁLISE DO CENÁRIO DE GERAÇÃO EÓLICA NO BRASIL: UM ESTUDO DA
IMPLEMENTAÇÃO E PREVISÃO FUTURA DOS PARQUES EÓLICOS
BRASILEIROS**

**CURITIBA
2022**

**ARTHUR SOLIGO GOMES
GABRIEL RIBEIRO BENEDITO**

**ANÁLISE DO CENÁRIO DE GERAÇÃO EÓLICA NO BRASIL: UM ESTUDO DA
IMPLEMENTAÇÃO E PREVISÃO FUTURA DOS PARQUES EÓLICOS
BRASILEIROS**

**ANALYSIS OF THE WIND GENERATION SCENARIO IN BRAZIL: A STUDY OF
THE IMPLEMENTATION AND FUTURE FORECAST OF BRAZILIAN WIND
PLANTS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Me. Marcelo Barcik.

**CURITIBA
2022**



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**ARTHUR SOLIGO GOMES
GABRIEL RIBEIRO BENEDITO**

**ANÁLISE DO CENÁRIO DE GERAÇÃO EÓLICA NO BRASIL: UM ESTUDO DA
IMPLEMENTAÇÃO E PREVISÃO FUTURA DOS PARQUES EÓLICOS
BRASILEIROS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de
Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 07/06/2022

Prof. Gerson Máximo Tiepolo
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Ulisses Chemin Netto
Professor Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Marcelo Barcik
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA
2022**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaríamos de agradecer aos nossos pais, Murilo Gomes Pereira e Rosiclei Maria Soligo Gomes e Sergio Benedito e Maria Costa Ribeiro, que nos ensinaram desde pequenos e até hoje nos auxiliam nessa jornada da vida com suas experiências. Eles que sempre nos apoiaram e fizeram-se presentes, sempre que possível, são o alicerce que nos proporcionou chegar até aqui.

Aos nossos irmãos e irmãs, Leonardo Soligo Gomes e Beatriz Ribeiro Benedito, sempre dispostos a nos ajudar, com seus suporte e incentivo, nos deram forças para superar grandes dificuldades. Agradecemos também a todos nossos familiares e amigos que, durante essa jornada, compartilharam momentos incríveis e inesquecíveis conosco.

Ainda, gostaríamos de agradecer a nossas queridas amadas, Viviane Akemi Miyazaki e Letícia Cardoso Ern. Elas que nos fazem sorrir até nos momentos mais simples da vida, nunca desistiram de nós e, sempre nos apoiando, fizeram-se imprescindíveis para chegarmos até aqui.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração, que foram capazes de proporcionar uma formação de extrema qualidade. Aos colaboradores externos, que proporcionaram o acesso aos laboratórios, sua limpeza e segurança, enfrentando todas as dificuldades ocasionadas pela pandemia.

Agradecemos também a todos os professores que nos acompanharam ao longo de nossa jornada educacional, desde os anos iniciais até a graduação. Em especial ao nosso orientador Marcelo Barcik, por todo apoio e paciência ao longo da elaboração deste trabalho.

Por fim, nosso obrigado a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa. Há muitas pessoas que conhecemos durante esse período e que, apesar de não citadas, contribuíram muito para nosso crescimento pessoal e profissional.

RESUMO

O cenário energético global atual se delinea para uma clara redução do consumo de fontes não-renováveis e aumento das fontes renováveis de energia. Dentro deste último grupo se encontra a energia eólica, que apresenta uma história recente de grande incremento de investimento em todo o mundo, especialmente na China e nos EUA. Hoje o Brasil tem sua matriz energética majoritariamente centrada em energias renováveis, sendo que a hidrelétrica é a principal delas, seguida da eólica (11,4% da matriz). A capacidade instalada de 19,954 GW (novembro de 2021) faz do Brasil o sétimo maior gerador de energia eólica no mundo e com uma das melhores perspectivas de crescimento. A partir disso, propõe-se no seguinte trabalho realizar uma revisão da literatura sobre histórico, fundamentos físicos da conversão energética, processo de instalação dos parques eólicos, funcionamento dos aerogeradores e contextualização dos cenários atuais de energia brasileiro e mundial. Além disso, este trabalho será base para a determinação do estudo de viabilidade dos parques eólicos. Assim, demonstra-se que cerca de 70% dos gastos totais de construção de um parque estão atrelados aos custos com aerogeradores e equipamentos auxiliares. Ainda, nos últimos anos o preço de contratação dos parques eólicos chegou a cerca de R\$80,00/MWh, sendo junto às PCH, o tipo de fonte de geração com a melhor relação entre custo unitário e tarifa de energia. A tudo isso, destaca-se a região Nordeste, responsável por cerca de 85,6% do total de geração eólica no país. Desta forma, com a evolução tecnológica adquirida nos últimos dez anos, a potência nominal média das turbinas cresceu cerca de 1 MW e a altura dos aerogeradores aumentou por volta de 40 m, ressaltando-se uma média de fator de capacidade anual de 50% para o país (e 63% para Sergipe, estado com maior média). Apesar de ainda não implementado no Brasil, já existem 36 projetos de parques *offshore* a serem instalados e, como conjectura futura da matriz energética, prevê-se um aumento para até 26 GW na capacidade instalada nacional.

Palavras-chave: Energia Eólica; Aerogerador; Energias renováveis.

ABSTRACT

The global energy scenario is currently outlined for a clear reduction in the consumption of non-renewable sources and an increase in renewable energy sources. Within this last group is wind energy, with a recent history of great investment growth worldwide, especially in China and the USA. Today, Brazil's energy matrix is mainly centered on renewable energies, hydroelectric being the main one, followed by wind (11.4% of the matrix). The installed capacity of 19,954 GW (November 2021) makes Brazil the seventh largest wind energy generator in the world and one of the best growth alternatives. Given these facts, the following paper proposes to carry out a literature review on history, foundations of the energy conversion, installation process of wind parks, operation of wind turbines and contextualization of current scenarios of Brazilian and world energy. In addition, this paper will be the basis for determining the feasibility study of wind parks. Therefore, it is demonstrated that about 70% of the total costs of building a farm are linked to the costs of wind turbines and auxiliary equipment. Also, in recent years, the price for contracting energy from wind farms reached about R\$80,00/MWh, along with the SHP, the source of generation with the best unit cost to tariff ratio. To all this, the Northeast region stands out, responsible for about 85,6% of the total wind generation in the country. Thus, with the technological evolution acquired in the last ten years, the average rated power of the turbines grew by around 1 MW and the height of the wind turbines increased by around 40 m, highlighting an average annual capacity factor of 50% for the country (and 63% for Sergipe, the state with the highest average). Although it has not yet been implemented in Brazil, there are already 36 projects for offshore farms to be installed and, as a future conjecture of the energy matrix, an increase is foreseen for the installation of up to 26 GW in the national capacity.

Keywords: Wind Power; Wind Generators; Renewable Energies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo de conversão de energia	19
Figura 2 - Distâncias entre os aerogeradores num parque eólico	20
Figura 3 - Curva de potência ideal para aerogeradores	21
Figura 4 - Partes constituintes de um aerogerador	23
Figura 5 - Detalhamento da nacele	24
Figura 6 - Aerogerador Smith-Putnam (1941)	26
Figura 7 - Exemplo de parque eólico <i>offshore</i>	31
Figura 8 - Transporte de um aerogerador <i>offshore</i>	31
Figura 9 - Comparação do tamanho de um aerogerador <i>offshore</i>	32
Figura 10 - Parque eólico <i>onshore</i> de Chafariz	33
Figura 11 - Atlas do potencial eólico brasileiro na altitude de 50m.....	34
Figura 12 - Evolução da capacidade eólica instalada no Brasil.....	35
Figura 13 - Evolução do uso de energias renováveis no Brasil.....	37
Figura 14 - Evolução da geração de energia eólica no mundo de 2010 a 2020 (em GW).....	38
Figura 15 - Capacidade total instalada no mundo em 2020	39
Figura 16 - Produção de energia eólica mensal em 2020	40
Figura 17 - Número de residências que poderiam ser abastecidas com a energia eólica gerada ao mês.	41
Figura 18 - Investimentos em novos projetos do setor eólico (em milhões de dólares)	42
Figura 19 - Geração de energia eólica <i>onshore</i> no mundo de 2000 a 2026 (em TWh)	44
Figura 20 - Diagrama para instalação de torres anemométricas de parques eólicos em operação.	51
Figura 21 - Etapas do processo de obtenção de licenciamento ambiental	55
Figura 22 - Peso relativo dos custos no orçamento total dos projetos	56
Figura 23 - Preço das componentes de aerogeradores	57
Figura 24 - Evolução do número de projetos cadastrados por fonte	62
Figura 25 - Capacidade média da potência instalada dos projetos de Geração eólica e fotovoltaica.	63
Figura 26 - Evolução dos preços de CAPEX da fonte eólica.	63

Figura 27 - Evolução dos valores de Operação e Manutenção da fonte eólica.....	64
Figura 28 - Faixa de valores de LCOE para a fonte eólica e demais fontes renováveis	65
Figura 29 - Gráfico de Potência (kW) x Investimento (R\$) por fonte de energia	67
Figura 30 - Gráfico do Custo Unitário (R\$) x Tarifa de Energia (R\$).....	68
Figura 31 - Médias de potência nominal das turbinas, diâmetro do rotor e altura do cubo	69
Figura 32 - Média dos fatores de capacidade anual (%), com base no P50, por estado a partir de 2016	70
Figura 33 - Empreendimentos eólicos - potência total cadastrada (MW), por região, leilão e ano	70
Figura 34 - Preço de contratação de empreendimentos eólicos nos leilões de energia do ACR e energia.....	71
Figura 35 - Áreas em licitação para a implementação de energia eólica <i>offshore</i> no Brasil	74
Figura 36 - Curva de custos no decorrer dos anos para as fontes renováveis.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidade instalada por fonte no Brasil em novembro/2021.....	36
Tabela 2 - Comparação da matriz elétrica mundial (2018) com a brasileira (2020) ..	37
Tabela 3 - Parâmetros de custo.	71
Tabela 4 - Parâmetros de custo para a fonte eólica <i>offshore</i> no Brasil.....	73
Tabela 5 - Síntese dos dados de projetos geradores usados nos estudos PNE 2050	75

LISTA DE ABREVIATURAS DE SIGLAS

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
AEGE	Sistema de Acompanhamento de Empreendimentos Geradores de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ART	Anotação de Responsabilidade Técnica
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
DAELT	Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
DEA	Análise de Demanda de Energia
DIT	Demais Instalações de Transmissão
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
FACTS	<i>Flexible Alternating Current Transmission</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IEA	International Energy Agency
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAE	Produção Anual de Energia
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
SIN	Sistema Interligado Nacional

TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
TUST	Tarifa de Uso dos Sistemas Elétricos de Transmissão
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UTM	Universal Transversal de Mercator
SVC	<i>Static Var Compensator</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Massa específica do ar
R	Raio da pá do aerogerador
η	Rendimento dos equipamentos
n	Coefficiente de rugosidade.
Z_0	Comprimento de rugosidade
K_c	Constante de Von Kármán ($K_c = 0,4$)
Vref	Velocidade de referência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Tema	14
1.1.1 Delimitação do tema	15
1.2 Problemas e premissas	15
1.3 Objetivos	16
1.3.1 Objetivo Geral	16
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4 Justificativa	16
1.5 Procedimentos metodológicos	17
1.6 Estrutura do Trabalho	17
2 GERAÇÃO EÓLICA E CENÁRIO ATUAL	19
2.1 Conversão da energia cinética em energia elétrica	19
2.2 Aplicação de geradores para energia eólica	19
2.2.1 Extração da energia	21
2.3 Análise física e construtiva de uma turbina eólica moderna	22
2.3.1 A Torre	22
2.3.2 Rotor	22
2.3.3 Nacele	23
2.3.4 As pás	24
2.4 Evolução dos aerogeradores e aplicações comerciais	25
2.4.1 O moinho	25
2.4.2 O início dos aerogeradores	25
2.5 Fatores relevantes para o dimensionamento de um aerogerador	27
2.5.1 Rugosidade	27
2.5.2 Orografia	27
2.5.3 Influência da altura do vento	27
2.6 Conexão com a rede de transmissão	29
2.6.1 Solicitações do ONS	29
2.6.2 Qualidade da energia fornecida à rede	29
2.7 Geração <i>Offshore</i>	30
2.8 Geração <i>Onshore</i>	32
2.9 Histórico da energia eólica no Brasil	33
2.10 Matriz Energética	36

2.11 Energia eólica no mundo	38
2.12 Energia eólica no Brasil	40
2.12.1 Investimentos no Brasil	41
2.13 Impacto Socioambiental	42
2.14 Perspectivas futuras	44
3 IMPLEMENTAÇÃO DO PARQUE EÓLICO	47
3.1 Características gerais do empreendimento	47
3.2 Medições eólicas	48
3.2.1 Potencial Eólico e Produção Anual de Energia	52
3.3 Sistemas de conexão	53
3.4 Locação e desenhos de projeto	53
3.5 Documentações legais e licenças ambientais	54
4 CUSTO DE IMPLANTAÇÃO DO PARQUE EÓLICO	56
4.1 Custos de Equipamentos e Sistemas Auxiliares	57
4.2 Custos de Conexão, Integração e Rede	59
4.3 Custos de Obras e Edificações Civis	60
4.4 Outros Custos	61
5 CUSTO DA ENERGIA E COMPETITIVIDADE NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA	62
5.1 Custo Nivelado de Energia (LCOE)	64
5.2 Pontos Relevantes em Relação à Expansão da Energia Renovável	65
5.3 Relação Potência x Investimento	67
5.4 Perspectivas para o custo futuro da fonte eólica <i>onshore</i>	68
5.5 Perspectivas para o custo futuro da fonte eólica <i>offshore</i>	71
5.6. Comparativo entre custos futuros de geração entre as fontes	74
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
REFERÊNCIAS	78
ANEXO A – MODELO DE DECLARAÇÃO PARA FINS DE CADASTRAMENTO E HABILITAÇÃO TÉCNICA DE EMPREENDIMENTOS EÓLICOS.	84
ANEXO B – DOCUMENTOS DO PROCESSO DE HABILITAÇÃO	86
ANEXO C – PLANILHA DE CUSTOS CIVIS DE UM PARQUE EÓLICO.	88

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema

O desenvolvimento humano nos últimos séculos se deu graças ao domínio da geração elétrica. Desde a Primeira Revolução Industrial, com a utilização da queima de carvão, o desenvolvimento tecnológico teve grande crescimento e propiciou uma melhora na qualidade de vida em sociedade. Porém, com a expansão da tecnologia, cada vez mais necessita-se de recursos e energia. Portanto, torna-se cada vez mais importante a preocupação com a preservação ambiental e de recursos naturais, que são limitados no planeta.

É importante ressaltar que, apesar do Brasil ser um país com grande potencial de geração hídrica, tem-se mostrado, nos anos de 2020 e 2021, diversos períodos com longas estiagens, causando a diminuição dos reservatórios, dificultando a geração hidroelétrica e conseqüentemente, ocasionando o aumento dos custos em energia. Assim, é importante que o país se mantenha com uma injeção constante e confiável de energia na rede e que não dependa apenas das fontes não renováveis para complementação (CAMPOS, 2018).

Desde os anos 1980, a geração eólica, acompanhada da redução do custo do kWh, progrediu notadamente e, auxiliada pelo intenso desenvolvimento tecnológico, pôde se tornar parcialmente competitiva em preço e escala de produção (PINTO, 2012). Assim, graças a incentivos para diversificação na matriz energética, novas alternativas vêm surgindo para suprir o mercado de energia elétrica e reduzir os impactos ambientais no Brasil (FADIGAS, 2011).

Por isso, nota-se o crescimento no desenvolvimento e implantação de usinas elétricas, cuja fonte seja de natureza renovável e provém de uma energia limpa. Aqui, dá-se importância à geração eólica que, através de grandes torres com aerogeradores acoplados, consegue transformar a energia dos ventos em energia elétrica e que, no Brasil, vem ganhando oportuno espaço, principalmente na região Nordeste do país.

Com uma capacidade instalada de quase 20 GW de potência, o Brasil tem ganhado espaço no mercado de geração eólica, ocupando o 7º lugar no ranking mundial de capacidade eólica acumulada, perdendo apenas para China, EUA, Alemanha, Índia, Espanha e França (ABEEÓLICA, 2021).

Desta forma, evidencia-se a importância da viabilização e desenvolvimento de mais tecnologias para os parques eólicos. Para isso é necessária a realização de uma cadeia de suprimentos local em conjunto com ações de Estado, para aumentar a participação da geração eólica com eventual diminuição do MWh por ela produzido. Ainda, a elaboração de novos leilões de energia, a entrada de novos fornecedores e a redução de preços de equipamentos se complementam para melhorar a competitividade da energia eólica no território brasileiro. Com este tipo de incentivo, é possível que ela se torne mais barata que a principal participante da matriz elétrica nacional, a hidrelétrica (VIAN et al., 2021).

1.1.1 Delimitação do tema

Considerando o eventual impacto da energia eólica no Brasil e seu súbito crescimento, o presente trabalho se focará na história da implementação dos parques eólicos no Brasil, o atual cenário de geração nacional, bem como nas motivações e viabilidades de execução dos parques brasileiros.

1.2 Problemas e premissas

Para o desenvolvimento das tecnologias de natureza eólica no Brasil, é preciso que o conhecimento a respeito do tema seja transmitido e que seja entendida a importância da geração renovável para um futuro saudável do planeta.

Até a década de 1980, o foco da geração eólica era em pequena escala com modelos de aerogeradores de potências abaixo de 100 kW. Ao começo do século 20, as turbinas eram instaladas principalmente em áreas rurais e isoladas, porém já instaladas em diversos países (CHAGAS et al., 2020). Ademais, a alta demanda por matrizes energéticas renováveis e o desenvolvimento da tecnologia de geração eólica reestruturou o mercado nacional e internacional, visando a implantação de parques eólicos para suprir a modificação da matriz energética global. Em virtude disso, deve-se atentar ao potencial brasileiro, que tem crescido muito, principalmente na região Nordeste.

Além disso, é preciso que o estudo e a pesquisa estejam acessíveis e viáveis à população, contemplando mais recursos teóricos em língua nacional.

1.3 Objetivos

Este projeto tem por objetivo realizar uma revisão de literatura acerca dos parques eólicos e da geração deste tipo de energia, ilustrar a importância da implantação de energias renováveis no Brasil e demonstrar o processo de construção de um parque eólico.

A partir disso, em um segundo momento, será feita uma análise de viabilidade econômica dos parques eólicos no Brasil, levando-se em consideração o potencial energético eólico no país e os custos de construção e manutenção dos aerogeradores.

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho pretende detalhar quais são os estudos necessários para a implantação de um parque eólico, bem como as etapas de construções do mesmo. Além disso, demonstrar o cenário da geração eólica nacional atual e futuro.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Descrever os princípios físicos de funcionamento na conversão da energia eólica em elétrica;
- Analisar as etapas, métodos e normas utilizados para a execução dos parques;
- Descrever e expor as áreas e construções presentes em um parque eólico;
- Verificar os custos de implantação de um parque eólico *onshore* e de viabilidade econômica da energia gerada;
- Contextualizar o cenário atual da geração eólica no Brasil, evidenciar comparações com a introdução da tecnologia no país e a competitividade estrangeira atual;
- Avaliar o cenário futuro da implementação de novos parques eólicos no Brasil.

1.4 Justificativa

É de suma importância entender primeiramente o histórico e o panorama atual de certa tecnologia para seu posterior desenvolvimento. Considerando-se que a

implantação de parques eólicos em alta escala é um recurso relativamente novo para o cenário brasileiro e que as fontes de pesquisa da área são majoritariamente estrangeiras, é necessária a divulgação do tema para a pesquisa nacional.

Ademais, segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico, a geração energética do país pode ser classificada como hidro-termo-eólico. Decorrente disso, as graves secas que ocorreram em 2020 e 2021 e a vulnerabilidade das chuvas a condições climáticas e meteorológicas mostram que a disponibilidade de água é uma incerteza (CAMPOS, 2018). Diante disso, faz-se necessária a diversificação da matriz energética brasileira, a fim de possibilitar recorrer a outras formas de geração elétrica quando adversidades, além do controle humano, determinam escassez de recursos.

Assim, conhecimentos relacionados à necessidade de geração elétrica, a demanda mundial de preservação ambiental e ao potencial energético brasileiro eólico, serão o tema e objetivos para a pesquisa que segue capazes de suprir as necessidades energéticas atuais.

1.5 Procedimentos metodológicos

O tipo de pesquisa escolhido para desenvolvimento deste trabalho foi o método descritivo, composto pela abordagem quantitativa.

Para a realização dos objetivos acima propostos, será realizada uma ampla revisão bibliográfica de livros, artigos, notícias, teses, dissertações, trabalhos de conclusão de curso e demais fontes que possam contribuir com o embasamento teórico da pesquisa.

A partir destas bases teóricas, será feita:

- A definição dos princípios de funcionamento da geração eólica e implantação do parque eólico;
- Uma análise do panorama atual do Brasil e do mundo no que se refere às matrizes energéticas utilizadas e a importância da diversificação desta matriz.

Em um segundo momento será feita uma análise, por meio de dados, estatísticas e gráficos da viabilidade dos parques eólicos no Brasil.

1.6 Estrutura do Trabalho

Este trabalho de conclusão de curso segue a seguinte estrutura:

1- Introdução

O capítulo aborda o tema de forma ampla, visando contextualizar o projeto e justificar sua realização.

2- Geração eólica e cenário atual

Este capítulo é destinado a apresentar as bases teóricas e conhecimentos atuais acerca da energia eólica e os principais conceitos que serão utilizados durante a explanação do projeto. Ainda, traz uma análise da matriz elétrica e um panorama atualizado sobre a energia eólica brasileiro e no mundo.

3- Implementação do parque eólico

Descrição do passo a passo da construção e realização de um parque eólico.

4- Custo de implantação do parque eólico

Análise da divisão de gastos identificada durante a construção do parque.

5- Custo da energia e competitividade na matriz brasileira

Aqui, elucida-se o conceito do medidor *Levelized Cost of Energy*, além de apresentar pontos importantes para a expansão das energias renováveis no Brasil. Ainda, avalia-se a viabilidade na comparação entre potência e investimento dos parques eólicos e uma previsão futura para eles.

6- Considerações finais

Parcela destinada a conclusões importantes acerca da pesquisa realizada e determinação de processos subsequentes a serem realizados.

2 GERAÇÃO EÓLICA E CENÁRIO ATUAL

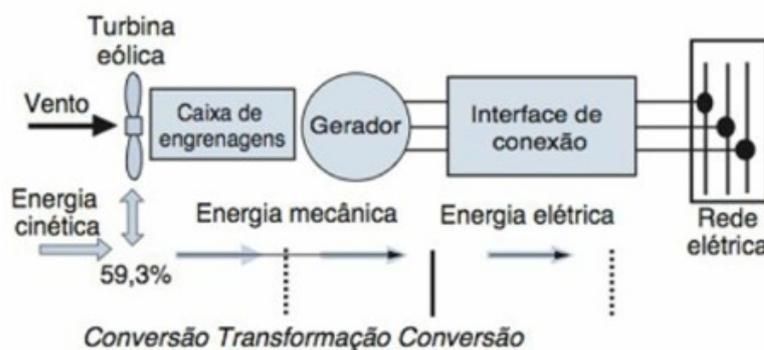
Para se entender a viabilidade de um parque eólico, primeiramente é necessário compreender os princípios de geração de energia elétrica por meio dos aerogeradores. Além disso, deve-se entender os diversos fatores que tornaram a energia eólica uma boa alternativa para o futuro da geração de energia, bem como a sua construção física e conexão com a rede de transmissão.

2.1 Conversão da energia cinética em energia elétrica

Para a geração da energia elétrica através dos geradores síncronos, é necessária uma máquina primária acoplada ao eixo do rotor. No caso da energia eólica, a máquina primária é a turbina eólica que realiza a rotação a partir da força dos ventos, gerando rotação do rotor e variação do fluxo magnético visto pelo estator do gerador elétrico, e a partir disso transformar energia cinética em elétrica.

A etapa de conversão da energia é distribuída em dois estágios: 1) a turbina utiliza a energia cinética do vento para girar, e 2) no rotor do gerador síncrono, a energia mecânica recebida é utilizada na conversão em energia elétrica, e esta é transmitida para a rede da concessionária conforme mostrado na Figura 1 (PINTO, 2012).

Figura 1 - Fluxo de conversão de energia



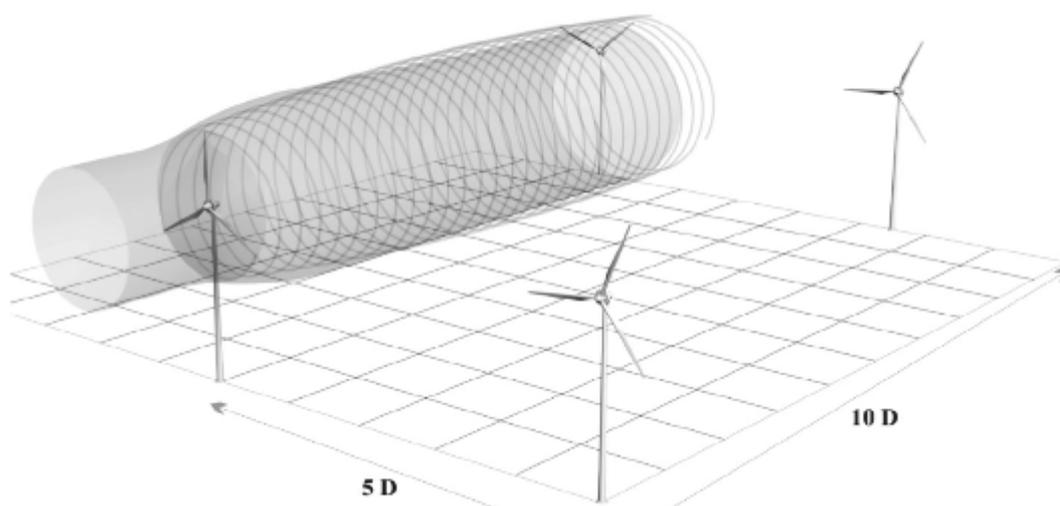
Fonte: Pinto (2012).

2.2 Aplicação de geradores para energia eólica

O vento, em qualquer ambiente, não possui uma velocidade constante e por isso, geralmente, é necessário a utilização de geradores de velocidades variáveis em conjunto com inversores (HAU, 2013).

Outra questão pertinente para o estudo de aerogeradores é o limite de Betz. O físico alemão mostrou que uma turbina eólica ideal possui como energia cinética capturada do vento um máximo de 59% da potência total disponível (VIAN et al., 2021). Isso associado a absorção da energia cinética realizada pelo aerogerador, gera redução da energia cinética do vento a jusante. Embora exista uma energia já desprendida anteriormente, o vento que adveio do aerogerador se somará a uma massa de ar após certa distância, recuperando grande parte da energia cinética cedida. Geralmente, é necessária uma distância estimada de 10 vezes o diâmetro do rotor à jusante e 5 vezes o mesmo parâmetro lateralmente para a instalação de outros aerogeradores em um parque eólico, conforme Figura 2 (GARBE; MELLO; TOMASELLI, 2011).

Figura 2 - Distâncias entre os aerogeradores num parque eólico



Fonte: GARBE; MELLO; TOMASELLI (2011).

Tendo isso em vista, para o controle da energia gerada, é necessário atingir alguns objetivos para que a geração eólica se torne competitiva e eficiente em relação aos outros tipos de geração, são alguns deles segundo Fadigas, 2011:

- Extração de energia: buscar a máxima extração de energia elétrica possível;
- Cargas mecânicas: proteção da turbina contra sobrecargas mecânicas;
- Qualidade de potência: atingir a qualidade requerida pela rede para a integração da energia gerada pelos aerogeradores.

2.2.1 Extração da energia

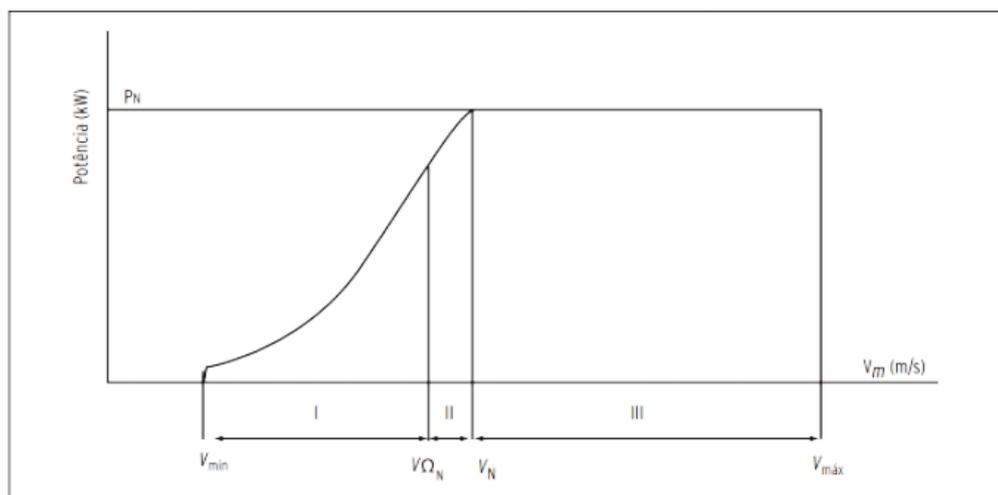
A curva de potência em relação a velocidade do vento interpreta a potência fornecida pelo vento para a turbina eólica. Os parâmetros para análise do gráfico são os seguintes:

- V_{\min} = Velocidade mínima do vento (vento de entrada);
- V_{\max} = Velocidade máxima do vento (vento de corte);
- P_N = Potência nominal;
- V_N = Velocidade nominal;

Ainda segundo Fadigas, 2011, os regimes de operação são delimitados em três regiões conforme ilustrado pela Figura 2:

- 1) Região I: extrair toda energia disponível;
- 2) Região II: após atingir a velocidade nominal, a velocidade da turbina é limitada para manter o ruído dentro dos limites permitidos, e também, para delimitar as forças centrífugas abaixo do limite suportado pelo rotor;
- 3) Região III: região de potência e velocidade do vento nominal, na qual, mesmo que a velocidade do vento seja maior do que a nominal, esta será limitada para não gerar sobrecarga no gerador elétrico.

Figura 3 - Curva de potência ideal para aerogeradores



Fonte: Fadigas (2011).

A potência ideal gerada pela turbina é dada pela Equação 1:

$$P_G = C_{PM\acute{a}x} P_e = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_{PM\acute{a}x} \eta V^3 \quad (1)$$

Onde:

V = Velocidade do vento, em metros por segundo (m/s);

$C_{PMáx}$ = coeficiente de eficiência de energia eólica de um rotor ideal, podendo variar de acordo com a referência utilizada. Ele pode ser, de acordo com a teoria clássica 0,593, ou de acordo com a teoria de Sabinin 0,686 (PINTO, 2012);

P_G = potência elétrica disponível, em watts (W);

P_e = potência do vento, em watts (W);

ρ = massa específica do ar, em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3)

R = raio da pá do aerogerador, em metros (m);

η = rendimento dos equipamentos, em percentagem (%).

A respeito do funcionamento do aerogerador é importante destacar que ao atingir uma velocidade menor do que o vento de entrada, a turbina é desligada, pois não é vantajoso manter o gerador em operação devido às grandes perdas e custos de operação. Além disso, caso o vento ultrapasse a velocidade máxima estipulada, o aerogerador volta a desligar. Dessa forma, sua integridade mecânica será preservada contra possíveis sobrecargas.

2.3 Análise física e construtiva de uma turbina eólica moderna

A maior parte dos parques eólicos brasileiros seguem o seguinte tipo de aerogerador: turbina constituída por três pás, eixo de rotação horizontal, velocidade variável (vento não constante) e controle dos ângulos das pás para delimitar a potência nominal do gerador. Além disso, eles possuem três componentes principais: a torre, o rotor e a nacele (VIAN et al., 2021).

2.3.1 A Torre

A estrutura da torre serve para dar sustentação mecânica da turbina, além de sua altura permitir a instalação das pás (VIAN et al., 2021). O material mais empregado atualmente para sua confecção é o aço (PINTO, 2012).

2.3.2 Rotor

O rotor é constituído pelo cubo, onde são fixadas as pás e pelas próprias pás (VIAN et al., 2021). Podem ser construídos em aço ou liga metálica de alta resistência (PINTO, 2012).

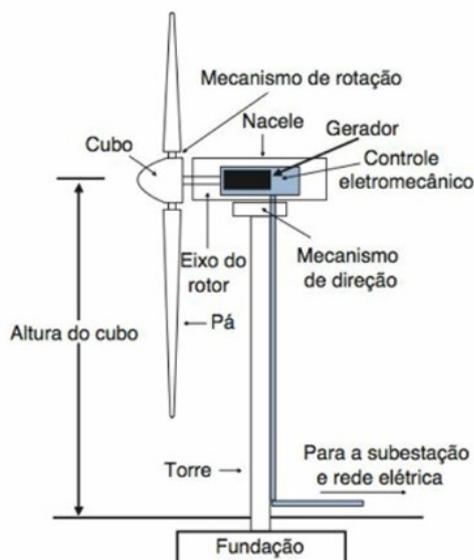
2.3.3 Nacele

A nacele é a caixa que se localiza atrás do rotor do aerogerador. Ela é responsável por direcionar o aerogerador conforme a direção do vento, para que o vento seja sempre incidente. Geralmente, há o transformador nesse local para diminuir as perdas no aerogerador. O transformador também poderá ser localizado na base da torre do sistema (VIAN et al., 2021).

Também é encontrado nesse local o anemômetro, que possui a função de medir a velocidade do vento, e complementar a este, a biruta, cuja função é determinar a direção do vento (PINTO, 2012).

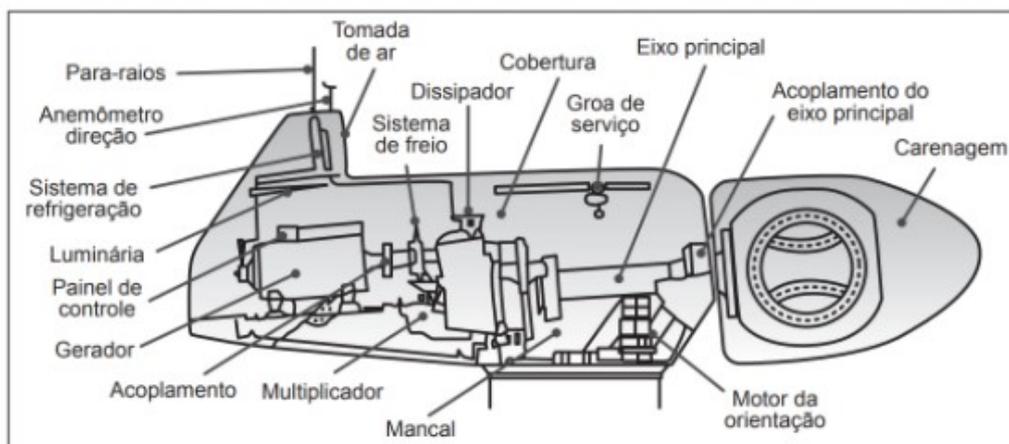
As Figura 4 e 5 ilustram as partes do gerador e a nacele.

Figura 4 - Partes constituintes de um aerogerador



Fonte: Pinto (2012).

Figura 5 - Detalhamento da nacele



Fonte: Fadigas (2011).

2.3.4 As pás

No geral, quanto maior a área de contato, maior será a energia disponível para a conversão. Então, com o avanço da tecnologia, essa parte do aerogerador, juntamente com as torres, alcançou grandes dimensões.

As pás são determinadas por alguns parâmetros, sendo eles (AWASTHI, 2018):

- Sua forma aerodinâmica que busca aumentar a sustentação e laminar de forma suave o vento, tendo por consequência a diminuição da turbulência e o aumento da velocidade do vento;
- Área de contato da lâmina;
- Distância da lâmina para cubo: a pá possui giro maior próximo ao cubo;
- Conicidade da lâmina: as lâminas são mais largas próximas ao cubo, por razão do aumento do torque, e se aproximando de sua extremidade, elas se tornam mais estreitas;
- Resistência mecânica das chapas construtivas;
- Transporte: grande parte dos parques eólicos são afastados dos grandes centros, portanto, o deslocamento das pás até o local de instalação deve ser levado em conta.

2.4 Evolução dos aerogeradores e aplicações comerciais

2.4.1 O moinho

O início dos aerogeradores na história foi com o seu precursor: o moinho. Diferentemente dos aerogeradores modernos, de enormes dimensões e focados na geração de energia elétrica, os moinhos possuíam mais de uma função: bombear água, produzir energia elétrica (mais recente) e moer grãos (SIMÕES MOREIRA, 2021).

2.4.2 O início dos aerogeradores

Em 1881, que Poul La Cour construiu um protótipo de turbina eólica utilizando um gerador de corrente contínua na Dinamarca, possuindo como finalidade alimentar as lâmpadas da época (SIMÕES MOREIRA, 2021). Além da invenção das turbinas eólicas, Poul La Cour conseguiu disseminar seu conhecimento através da Associação Dinamarquesa dos Engenheiros de Energia Eólica, fundada por ele em 1903, além de ter sido professor na escola de ensino médio em Askov, Dinamarca, também publicou um periódico sobre eletricidade e energia eólica e um livro em 1904 (PINTO, 2012).

A produção dos aerogeradores foi crescendo de forma acelerada na virada do século XIX para o século XX, levando energia principalmente para as fazendas, pois eram considerados sistemas isolados e seria muito dispendioso levar energia até essas localidades (SIMÕES MOREIRA, 2021).

No início do século XX, a Alemanha e os EUA se destacavam com um início promissor da energia eólica. O primeiro país buscava a autossuficiência energética, pois passava por um período de fechamento de sua economia. Já o segundo país, se destacou pela implementação de diversos empreendimentos eólicos em áreas rurais, construindo cerca de 50.000 máquinas eólicas durante a década de 1950 (PINTO, 2012).

O aerogerador Smith-Putnam, construído em 1941, já apresentava dimensões relevantes, o primeiro a possuir mais de 1 MW, possuía um gerador síncrono de 1250 kW, funcionava em corrente alternada e era diretamente conectado à rede, como ilustra a Figura 6 (SIMÕES MOREIRA, 2021).

Figura 6 - Aerogerador Smith-Putnam (1941)



Fonte: Simões Moreira (2021).

Em 1980, o primeiro parque eólico *onshore* no mundo possuía cerca de 0,6 MW, constituído por vinte turbinas eólicas de 30 kW, instaladas em New Hampshire, Reino Unido (AWASTHI, 2018).

No período entre 1940 e 1980, os parques eólicos não se desenvolveram em grande escala devido à sua baixa eficiência, aliados ao preço baixo dos combustíveis fósseis da época e a baixa consciência ambiental durante esse intervalo. A grande crescente dos parques eólicos se deu a partir da década de 1990 (AWASTHI, 2018; PINTO, 2012).

No final da década de 1970 até o final da década seguinte, nos Estados Unidos, houve um movimento de incentivos do governo americano voltado para a expansão da energia eólica no país. Esse evento teve início após os 2 choques do petróleo ocorridos na década de 1970 e contou com a ajuda de diversas empresas gigantes do setor tecnológico, como Boeing, General Electric (GE), Westinghouse, além de empresas alemãs, auxílio da Nasa e um orçamento inicial de 200 milhões de dólares (PINTO, 2012).

Como resultado daquele empreendimento, diversos aerogeradores de alta potência foram desenvolvidos e testados, como um modelo possuindo até 4 MW de potência, a WTS-4 (PINTO, 2012). Uma curiosidade a respeito dessas turbinas, é de

que grande parte possuía até duas pás, ao invés do padrão atual de 3 pás. Por essa razão as pás deveriam ser de uma envergadura maior, o que ocasionava fadiga nos materiais. Esse foi um dos fatores que levaram o projeto ao fim (DA PURIFICAÇÃO; DELLA FONTE, 2012).

Levando em consideração o sucesso adquirido pela Dinamarca no desenvolvimento dos aerogeradores, em 1991, criaram o primeiro parque eólico *offshore*, a cerca de 1,6 km da costa dinamarquesa, próximo de Vindeby (PINTO, 2012). Um exemplo de sucesso dinamarquês é a Vestas, uma das maiores fabricantes de aerogeradores do mundo e que também possui presença no território brasileiro.

2.5 Fatores relevantes para o dimensionamento de um aerogerador

2.5.1 Rugosidade

A definição de rugosidade é a medida das variações do relevo a ser estudado. O vento tende a sentir uma forte influência do que está próximo ao solo até cerca de 100 metros, por essa razão, o estudo da rugosidade possui uma grande relevância para a criação de parques eólicos. Um exemplo é de um lago, ou uma superfície plana tende a possuir uma baixa rugosidade, enquanto uma área urbanizada tende a possuir um coeficiente maior (PINTO, 2012).

2.5.2 Orografia

O estudo da orografia traz as diferenças sutis nos relevos da região a ser estudada, se varia o tipo de terreno, sua inclinação natural, dentre outros aspectos (PINTO, 2012).

Da mesma forma, os movimentos das massas de ar e quantidade de precipitações, também são influenciados pelo processo de formação do relevo na região. Como destaque, sabe-se através da orografia, que os picos das montanhas são responsáveis por acelerar a velocidade dos ventos (PORTILLO, 2019).

2.5.3 Influência da altura do vento

A altura do vento influencia a altura que deve ser instalada a turbina eólica, adicionalmente, a escolha da turbina deve considerar a velocidade média do vento, a densidade do ar, além do índice de turbulência.

Segundo Simões Moreira, 2021, através de alguns estudos foi possível equacionar alguns fatores que influenciam no perfil do vento no local, tratam-se das leis da Potência e Logarítmica.

1) Lei da Potência - é definida pela seguinte equação:

$$V = V_r \left(\frac{H}{H_r} \right)^n \quad (2)$$

Onde:

V = velocidade do vento na altura estipulada, em metros por segundo (m/s);

V_r = velocidade do vento na altura de referência (medida), em metros por segundo (m/s);

H = altura desejada, em metros (m);

H_r = altura de referência utilizada, em metros (m);

n = coeficiente de rugosidade, sem unidade.

Para a determinação do coeficiente de rugosidade, é utilizado uma tabela pré-determinada com diversos coeficientes calculados para diferentes tipos de vegetação. Por não ser do escopo deste trabalho, pode-se encontrar diversas tabelas contendo coeficientes de rugosidade disponíveis em livros especializados e catálogos de fabricantes de aerogeradores (SIMÕES MOREIRA, 2021).

2) Lei Logarítmica – é definida pela seguinte equação:

$$V(z) = \frac{V_0}{K_c} \ln \frac{z}{Z_0} \quad (3)$$

Em que:

V = Velocidade do vento na altura z , em metros por segundo (m/s);

Z_0 = comprimento de rugosidade – caracterizada pela rugosidade do terreno, em metros (m);

K_c = constante de Von Kármán ($K_c = 0,4$), sem unidade;

V_0 = velocidade de atrito relacionada com a tensão de cisalhamento na superfície e a massa específica do ar, em metros por segundo (m/s).

Obstáculos, como árvores, prédios, depósitos, entre outros, provocam um impacto no perfil de escoamento do vento. Em decorrência desse fenômeno, estudos mostram a redução da velocidade e a conseqüente diminuição da potência fornecida pelo vento, além de efeitos de turbulência, em razão do desnível relevante no terreno (SIMÕES MOREIRA, 2021).

Visto isso, para a implementação de um parque eólico é necessária uma altura de cerca de 150 m e isto deve-se ao fato de que com a proximidade do solo, a velocidade do vento é próxima a zero, entretanto, na camada-limite superficial (que varia de 10 a 150 metros dependendo do horário no dia e que sofre influência da rugosidade do solo) o vento se comporta com um crescimento relevante e de forma exponencial e logarítmica (PINTO, 2012).

2.6 Conexão com a rede de transmissão

O ponto de conexão com a rede num parque eólico é definido, geralmente, como o lado de alta do transformador elevador do parque eólico. O desvio de 2% em relação a tensão nominal é um dos limites estabelecidos para a operação do parque, outro limitante seria a potência de curto-circuito no ponto de conexão com a rede (PINTO, 2012).

2.6.1 Solicitações do ONS

Para ter um maior controle sobre as usinas eólicas e seu fornecimento para a rede elétrica, o ONS realizou algumas exigências para o modo de controle da energia disponibilizada: controle de tensão, o controle de potência reativa e o controle do fator de potência (VIAN et al., 2021).

O controle de tensão deve ser regulado para variar entre 0,95 pu e 1,05 pu, conforme necessidade do Sistema Interligado Nacional. Já o controle da potência reativa deve ser ajustável entre 2% a 7% da potência reativa nominal. Para finalizar as solicitações do ONS, os modos de controle do fator de potência e de potência reativa devem ser ligados quando requisitados pelo ONS (VIAN et al., 2021).

2.6.2 Qualidade da energia fornecida à rede

Por razão da velocidade do vento ser variável e o gerador mais utilizado para usinas eólicas de grande porte serem geradores síncronos, o sistema deve ser considerado instável. Entretanto, com a evolução da tecnologia acoplada aos sistemas de geração eólica, alguns instrumentos foram adicionados para controle da qualidade de energia que o aerogerador fornecerá à rede, alterando a qualidade final da energia disponibilizada.

O primeiro caso seria o controle de transitórios na rede, caso que ocorre quando liga ou desliga a turbina eólica da rede. Para contornar este problema, os aerogeradores se conectam a rede apenas quando estiverem com valores próximos à velocidade de sincronismo (HENRIQUES, 2016).

O segundo caso seria o controle das harmônicas, as quais se definem como ondas semelhantes às ondas senoidais da rede, com a diferença de serem múltiplas de frequência da rede. Conversores utilizados em sistemas eólicos normalmente são baseados em tiristores, equipamentos que podem influenciar na geração de ondas harmônicas. Todavia, com a utilização de conversores de alta frequência, a partir de 3 kHz, tornam mínimo o impacto gerado por esses conversores (HENRIQUES, 2016).

Por fim, o *flicker*, fenômeno criado a partir da flutuação ocasionada pela variação da velocidade do vento, ou do efeito de sombra causado pela torre de sustentação, pode gerar perturbações não previstas à rede, ocasionando a comutação de estado do gerador síncrono, resultando nas flutuações indesejadas. Com isso, algumas técnicas de medições, monitoramento e controle, são utilizadas nesses casos para amenizar essa anomalia na rede (HENRIQUES, 2016).

2.7 Geração *Offshore*

Pode-se definir a geração de energia elétrica *offshore* como a geração em alto mar (Figura 7). A palavra *offshore* é utilizada há muito tempo para se referir a extração de petróleo, comumente realizada em mar aberto. A ideia da realização dessa modalidade de geração veio de alguns aspectos relevantes, são eles (IBERDROLA, [s.d.]):

- Velocidade maior do vento no mar, pois não há barreiras;
- Energia renovável;
- Energia limpa;
- Localidade abundante para a instalação de parques eólicos;
- Sem impacto à poluição sonora e visual;
- Facilidade de transporte marítimo.

Figura 7 - Exemplo de parque eólico *offshore*



Fonte: IBERDROLA (s.d.).

Como conhecida, a dificuldade relevante na implantação de aerogeradores em regiões afastadas, não é um empecilho aqui. Não é necessário passar por estradas estreitas e esburacadas utilizando um caminhão longo e devagar, além do transporte ser realizado em horários determinados, e também, é necessária escolta e interdição de estradas. O transporte marítimo para a implantação dos aerogeradores é realizado através de grandes navios, conforme se vê na Figura 8. Nota-se que o aerogerador pode ser transportado em grandes partes, algo impossível de ser realizado em meio terrestre.

Figura 8 - Transporte de um aerogerador *offshore*



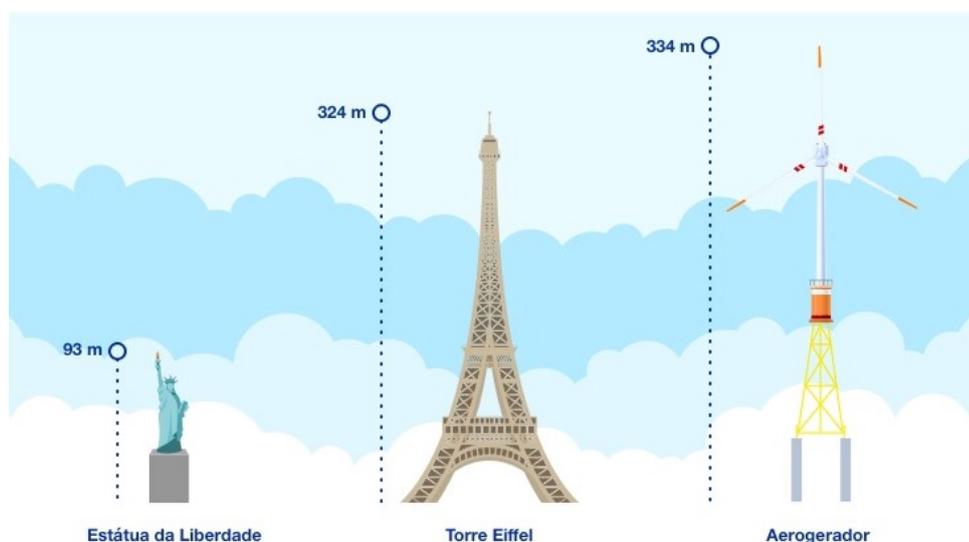
Fonte: IBERDROLA (s.d.).

Os parques eólicos dessa modalidade não se localizam em águas tão profundas. Segundo um estudo da WindEurope, publicado em fevereiro de 2019,

distam cerca de 33 km da costa, e estão localizados em uma profundidade média de 27 metros. Os países que mais se destacam nesse tipo de geração são o Reino Unido e a Alemanha, os quais possuem próximo a 40% de toda geração eólica, a utilização da geração *offshore* (IBERDROLA, [s.d.]).

As torres de geração eólica instalados pela IBERDROLA ilustram as grandes dimensões de um aerogerador *offshore* pode ter. Em 2014, no parque eólico de West of Duddon Sands, foram instalados aerogeradores com rotores de até 120 m de diâmetro e 3,6 MW de potência, em contraste, o maior aerogerador em implantação da empresa, que possui 220 m de diâmetro de rotor e 13 MW de potência. A comparação mostra um crescimento de quase 4 vezes em relação a potência inicial e o diâmetro do rotor teve uma evolução de 100 m nesse cenário, um contraste da modalidade em apenas 8 anos. A Figura 9 exemplifica as dimensões do aerogerador *offshore* (IBERDROLA, [s.d.]).

Figura 9 - Comparação do tamanho de um aerogerador *offshore*



Fonte: IBERDROLA (s.d.).

2.8 Geração *Onshore*

Conforme se viu no item anterior, a geração *offshore* se caracteriza pela conversão da energia cinética do vento em energia elétrica ocorrer em alto mar. Então, por conseguinte, a geração *onshore* é definida pela geração dos aerogeradores realizadas em terra.

Alguns fatores são importantes para determinar a instalação de um parque eólico *onshore* (IBERDROLA, [s.d.]):

- O impacto no meio ambiente local;
- O potencial energético;
- A variação do vento no local no decorrer do tempo;
- Condições geológicas e térmicas da região;
- Viabilidade de implantação e acessibilidade ao local.

Uma das maiores desvantagens de um parque eólico terrestre em relação à geração em alto mar é a potência média de cada aerogerador. Enquanto em 2020, a média da potência de um aerogerador terrestre era de 4,5 MW, os geradores eólicos marinhos podem alcançar em média 10 MW. Entretanto, para a criação de parques eólicos em alto mar, é necessária maior tecnologia, maior gasto com fundações, estruturas, e também, é preciso lembrar a necessidade do tratamento dos equipamentos quanto à corrosão e os esforços constantes gerados pela ação das ondas. Para ilustrar essa forma de geração de energia, a Figura 10 traz um dos parques eólicos no Brasil, o complexo eólico Chafariz, inaugurado em 2022 em Santa Luzia, na Paraíba (IBERDROLA, 2022, [s.d.]; SECIUK, 2022).

Figura 10 - Parque eólico *onshore* de Chafariz



Fonte: IBERDROLA (s.d.).

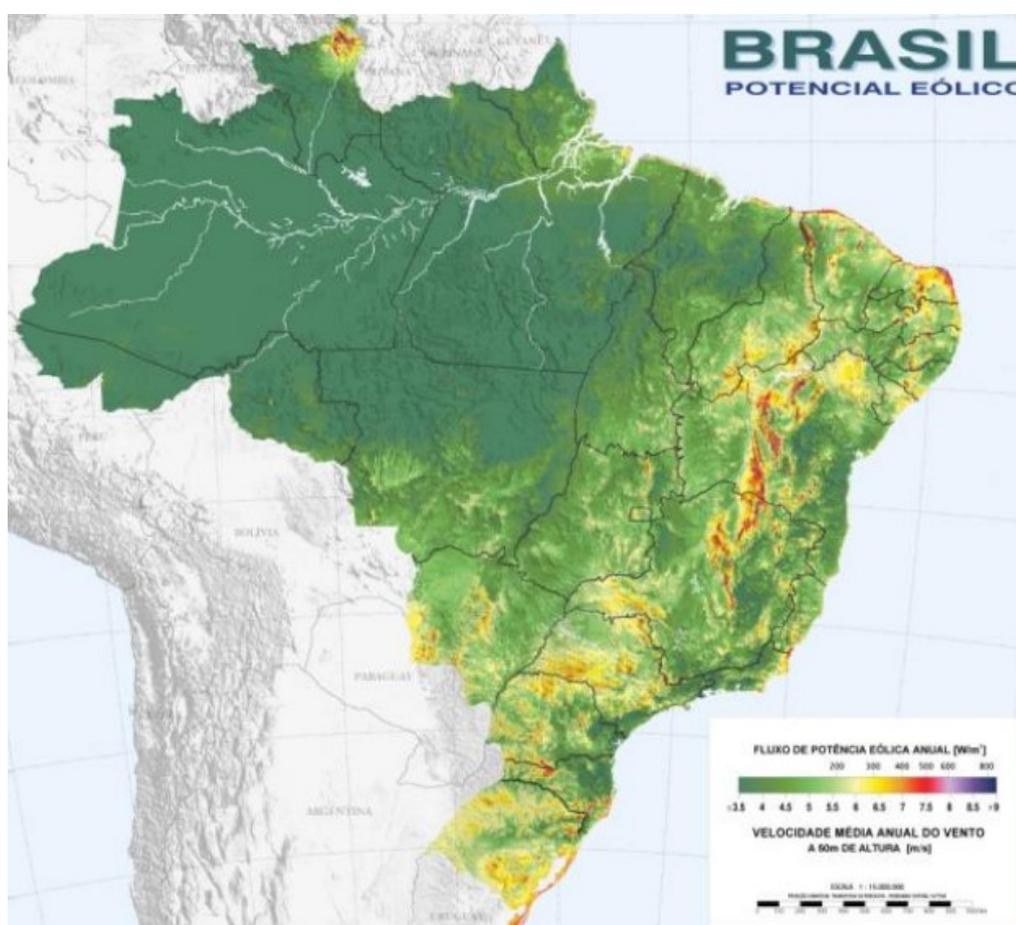
2.9 Histórico da energia eólica no Brasil

No Brasil, desde os anos de 1970 são realizados estudos acerca da viabilidade de parques eólicos, inventários sobre o potencial dos ventos brasileiros e

testes para o melhor posicionamento dos aerogeradores (GNOATTO, 2017). Porém, foi somente em 1992 que foi instalado o primeiro aerogerador em Fernando de Noronha (por meio do patrocínio do instituto de pesquisas dinamarquês Folkecenter). Durante os 10 anos seguintes houve pouco crescimento do setor por falta de investimento e desenvolvimento de tecnologia (GANNOUN, 2019).

Em 2001 a ELETROBRAS (Centrais Elétricas Brasileiras) divulgou um Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (GNOATTO, 2017). A Figura 11 demonstra este mapa para 50m de altitude.

Figura 11 - Atlas do potencial eólico brasileiro na altitude de 50m



Fonte: ELETROBRAS (2001).

Também em 2001, ocorreu uma grande crise energética no Brasil que ficou conhecida como o Apagão de 2001. Ela ocorreu por uma união de vários fatores como falta de chuvas por um longo período, falta de planejamento público em relação a gestão da energia, matriz energética com pouca variedade e dependente do sistema hidrelétrico (NASSA et al., 2015). Diante disso, neste mesmo ano houve a criação do Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA) que tinha por objetivo

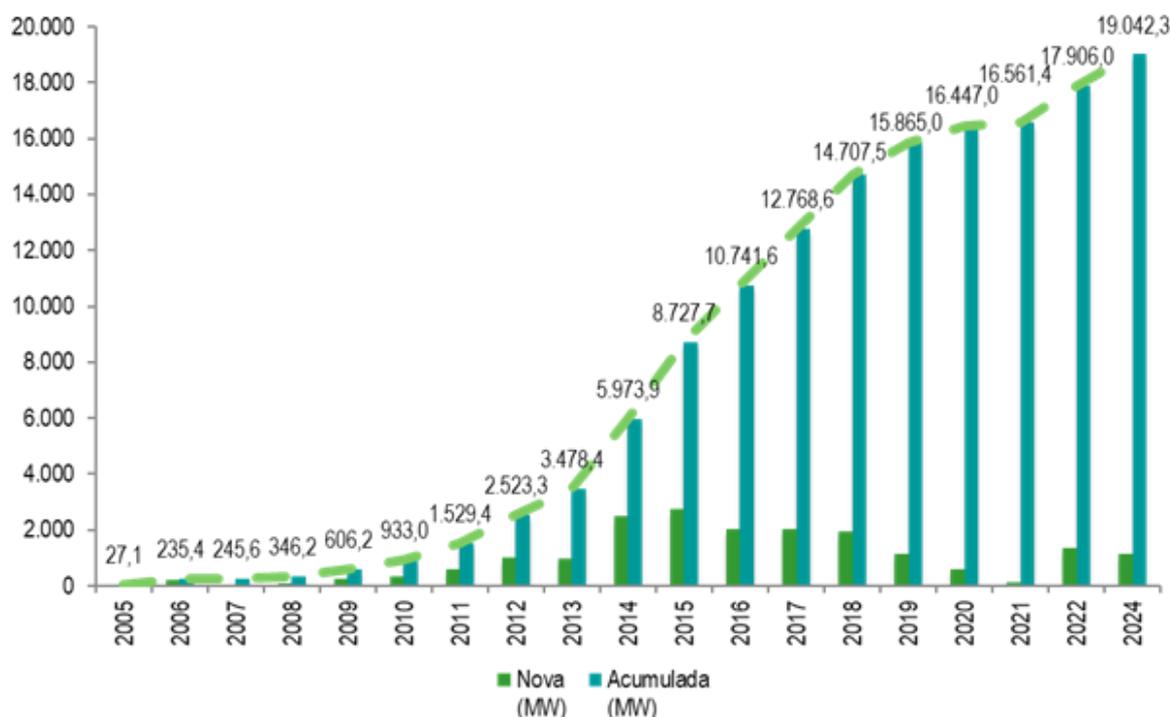
contratar projetos até dezembro de 2003 para geração de 1050 MW. O projeto não deu os resultados esperados (GANNOUN, 2019; GNOATTO, 2017).

Numa nova tentativa de estímulo governamental foi criado, em 2004, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) que além de incentivos para a parte energética também tinha uma parte social importante (GANNOUN, 2019; GNOATTO, 2017).

O primeiro leilão de comercialização de energia, exclusivamente eólico, aconteceu no final de 2009. Nele foram contratados 1,8 GW. A perspectiva é que até 2023, considerando apenas leilões já realizados, a geração de energia elétrica provinda da geração eólica atingirá 20 GW de potência (GANNOUN, 2019).

Abaixo, na Figura 12, mostra-se a progressão da capacidade eólica instalada no Brasil e uma projeção para os próximos anos.

Figura 12 - Evolução da capacidade eólica instalada no Brasil



Fonte: ANEEL/ABEEólica (2021).

Hoje há 726 parques eólicos no país, sendo que 620 estão no Nordeste. Isso faz do Brasil o 7º maior gerador de energia eólica do mundo e desta forma de energia a segunda mais importante na matriz energética brasileira hoje, atrás apenas da energia hidrelétrica (ABEEÓLICA, 2021; CARVALHO, 2021).

2.10 Matriz Energética

A energia é definida como a capacidade física de realizar trabalho, ou seja, é o conjunto de fontes de energia disponíveis em um determinado espaço (país, estado, município) (EPE; MME, 2021).

No mundo, a matriz energética é composta majoritariamente de fontes não-renováveis. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA) em 2018, a matriz mundial era composta 31,5% por petróleo e derivados, 26,9% por carvão mineral, 22,8% por gás natural, 9,3% por biomassa, 5% nuclear, 2,5% hidráulica e outras fontes (eólica, solar, geotérmica) representam 2%. Sendo assim, as renováveis têm uma participação de 14% (EPE, 2021).

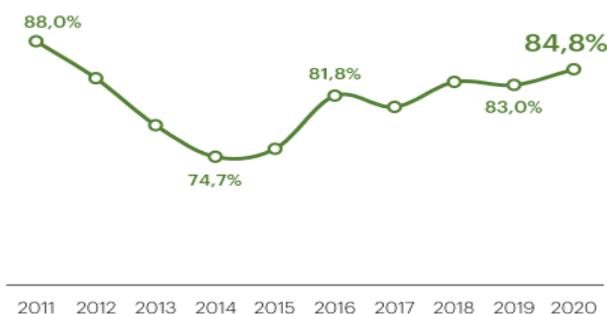
Segundo dados do Operador Nacional de Energia Elétrica (ONS) em novembro de 2021 a matriz energética brasileira atual tem composição conforme a Tabela 1 (ONS, 2021):

Tabela 1 - Capacidade instalada por fonte no Brasil em novembro/2021.

Tipo de energia	Capacidade instalada	Proporção no SIN
Hidroelétrica	108.675 MW	63,2%
Eólica	19.954 MW	11,4%
Termoelétrica (gás + GNL)	15.271 MW	8,9%
Biomassa	14.151 MW	8,2%
Termoelétrica (óleo + diesel)	4.346 MW	2,5%
Solar	4.132 MW	2,4%
Termoelétrica (carvão)	3.017 MW	1,8%
Nuclear	1.990 MW	1,2%
Outras	645 MW	0,4%

Fonte: ONS (2021)

Percebe-se que no Brasil a matriz renovável tem participação de 85,2%, muito diferente da média do restante do mundo (em 2018) que chegava a 14%. A tendência atual é de redução do uso de combustíveis fósseis, tanto pelo seu impacto ambiental quanto pela sua finitude (EPE; MME, 2021). A Figura 13 demonstra a evolução da utilização de energia renovável na matriz elétrica brasileira.

Figura 13 - Evolução do uso de energias renováveis no Brasil

Fonte: BEN (2021).

Neste cenário, é importante destacar o crescimento da energia eólica como fonte. Ela ultrapassou a energia nuclear em 2015 e a biomassa em 2019, o que demonstra sucesso dos incrementos e sucessivos investimentos (EPE; MME, 2021).

Em relatório liberado pela ANEEL, em março de 2021, houve liberação adicional de 383,66 MW em geração de energia para operação comercial. Destes, 92% foram originários de plantas eólicas. Ainda no primeiro trimestre de 2021, 87% da potência acrescida ao sistema foi de fonte eólica, indicando a franca expansão dos empreendimentos (ANEEL, 2021).

Na Tabela 2, traz a comparação entre as matrizes elétrica brasileira e mundial, segundo dados da IEA de 2021 (EPE, 2021):

Tabela 2 - Comparação da matriz elétrica mundial (2018) com a brasileira (2020)

Tipo de energia	Mundo	Brasil
Carvão mineral	38,0%	3,1%
Petróleo e derivados	2,9%	1,6%
Gás natural	23,0%	8,3%
Nuclear	10,2%	2,2%
Hidráulica	16,2%	65,2%
Biomassa	2,4%	9,1%
Solar, eólica, geotérmica, maré e outras	7,3%	10,5%

Fonte: IEA (2021).

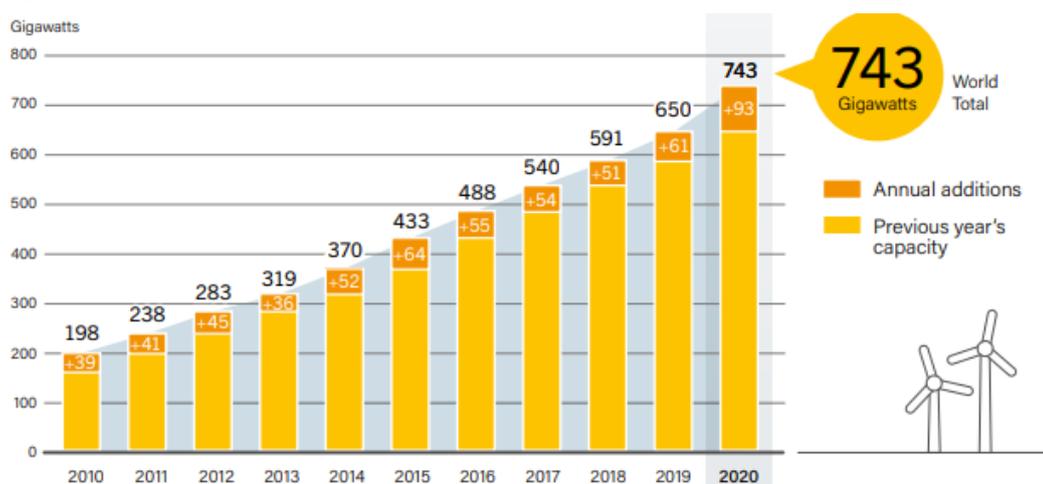
A comparação também se torna clara quando o assunto é matriz elétrica. O Brasil se encontra em um patamar de redução crescente do uso de energias não-renováveis e mantém uma proporção de uso de energias renováveis, entre elas a eólica, muito maior que a média global.

2.11 Energia eólica no mundo

Atualmente a energia eólica é a segunda fonte renovável mais usada no mundo, atrás apenas da energia hídrica. Dados da Agência Internacional de Energia Renovável (Irena) a capacidade total instalada de aerogeradores atingiu 743 GW sendo que destes, 698 GW foram *onshore* e o restante *offshore* (PORTAL SOLAR, 2021; REN21, 2021).

Atualmente, a energia eólica vem com padrão de franco crescimento no mundo. O Conselho Global de Energia Eólica divulgou em 2021 relatório que demonstra a evolução gráfica da geração energética por meio dos aerogeradores. O maior crescimento vem por conta da busca de fontes renováveis e redução do impacto ambiental causado por outras fontes (como a queima de combustíveis fósseis). A Figura 14 demonstra essa progressão (REN21, 2021).

Figura 14 - Evolução da geração de energia eólica no mundo de 2010 a 2020 (em GW)



Fonte: Conselho Global de Energia Eólica (2021).

Em relação a proporção de cada país no mundo desta geração, a Figura 15 demonstra a capacidade total instalada e os seus maiores geradores em 2020:

Figura 15 - Capacidade total instalada no mundo em 2020



Fonte: Conselho Global de Energia Eólica (2021).

No ano de 2020 houve uma adição de 93 GW de capacidade instalada no mundo, o que corresponde a um crescimento de 53% quando comparado a 2019 (LEE; ZHAO, 2021). Este incremento se deve especialmente à China e aos Estados Unidos. Ambos realizaram pesados investimentos na área por conta de políticas de incentivo fiscal do governo. O restante do mundo manteve a quantidade de produção média de 2019. Além disso, esse ano foi o primeiro em que os investimentos em energia eólica *offshore* foram maiores que os investimentos em petróleo e gás natural (REN21, 2021).

A China começou a se destacar no setor eólico em 2009 e atualmente possui, além de grandes parques distribuídos pelo país, pequenas instalações que suprem pequenas vilas da área rural (ABEEÓLICA, 2021; CUNHA et al., 2019). Os chineses são responsáveis pelo consumo de cerca de 24% da energia global total. Este crescimento relativamente recente do uso de energias renováveis se deve a grandes investimentos do governo, como um aporte de 0,9% do PIB em 2015. Tudo isto impulsionado por programas públicos com o objetivo de reduzir os impactos ambientais e manter uma geração de energia suficiente para o país. Atualmente a China gera mais do que o dobro da energia eólica quando comparada ao segundo colocado no ranking, os Estados Unidos (O'MEARA, 2020).

Já os Estados Unidos, que também vêm numa crescente de investimentos no setor, têm planos de fornecer energia eólica para 10 milhões de residências até 2030, a partir da geração de 30 GW. Se este objetivo for cumprido a redução de emissão de carbono seria de 78 milhões de toneladas. Para isto, o governo Biden pretende investir

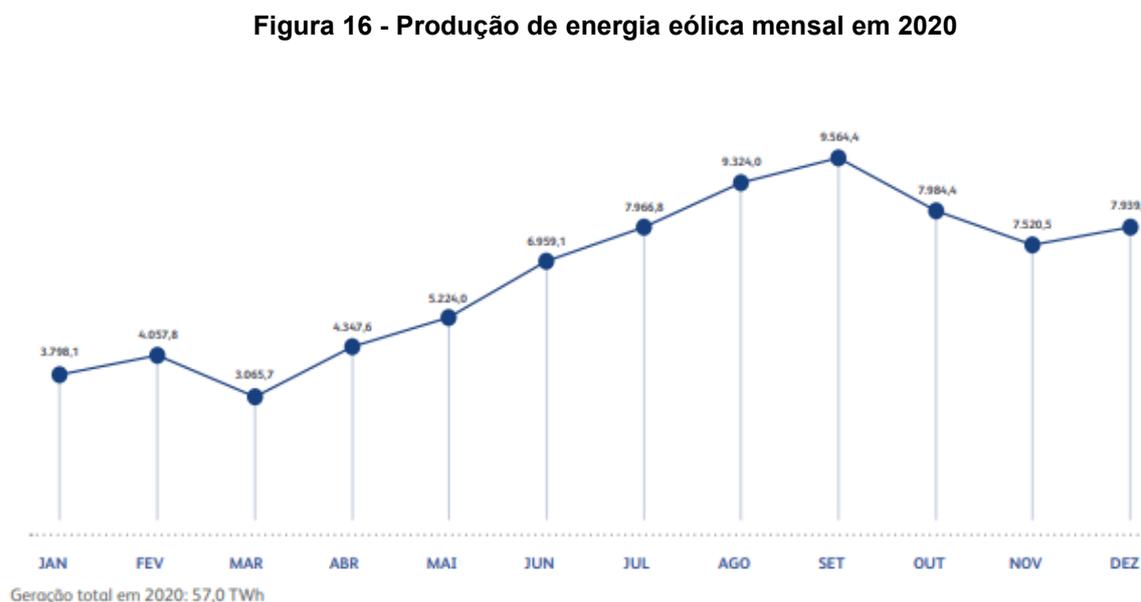
mais de 12 bilhões de dólares ao ano nas costas norte-americanas (AGENCE FRANCE PRESSE, 2021).

Em alguns países a energia eólica representa fonte importante da matriz energética: na Dinamarca é fonte de 58% da geração elétrica, na Irlanda 38% e no Reino Unido 24,2% (REN21, 2021).

2.12 Energia eólica no Brasil

O relatório mais recente da ABEEólica, publicado com dados de 2020, traz os números acerca da energia eólica no Brasil. Considerando todas as fontes de energia elétrica, segundo o relatório, foram instaladas em 2020 5,32 GW de potência e a eólica foi a fonte de maior expansão, representando um valor de 43,7% da nova capacidade instalada. Com a adição, a participação da energia eólica na matriz elétrica brasileira passou a ser de 10,13% na época (ABEEÓLICA, 2021). Os dados da ONS, demonstram que em novembro de 2021 a geração eólica já corresponde a 11,4% da matriz brasileira, o que supera previsões e expectativas de que o valor de 20 GW só fosse atingido em 2023 (GANNOUN, 2019; ONS, 2021).

No ano de 2020 foram gerados 57,0 TWh de energia eólica, sendo a distribuição mensal mostrada na Figura 16 abaixo (ABEEÓLICA, 2021).



Fonte: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica / ABEEólica (2021).

Em termos de representatividade e abastecimento em 2020, a geração eólica foi responsável por 9,97% na média de toda a geração injetada no SIN (Sistema

Interligado Nacional). No ápice da geração, em agosto, quando os ventos são melhores, contribuiu com 14,77% (ABEEÓLICA, 2021).

O subsistema do SIN Nordeste é o responsável pela maior parte da geração energética, cerca de 85,6% do total. Isso se deve a maior quantidade de parques distribuídos nos estados desta região. Os estados com maiores gerações em 2020 foram: Bahia (16,22 TWh), Rio Grande do Norte (15,59 TWh), Ceará (5,95 TWh), Piauí (5,91 TWh) e Rio Grande do Sul (5,81 TWh) (ABEEÓLICA, 2021).

A Figura 17 mostra a quantidade de residências que poderiam ser mantidas apenas com a produção eólica do ano de 2020 considerando um consumo médio por residência de 165 kWh por mês (utilizando dados da resenha mensal da Empresa de Pesquisa Energética). Na média, isso equivale a 28,8 milhões de residências ao mês.

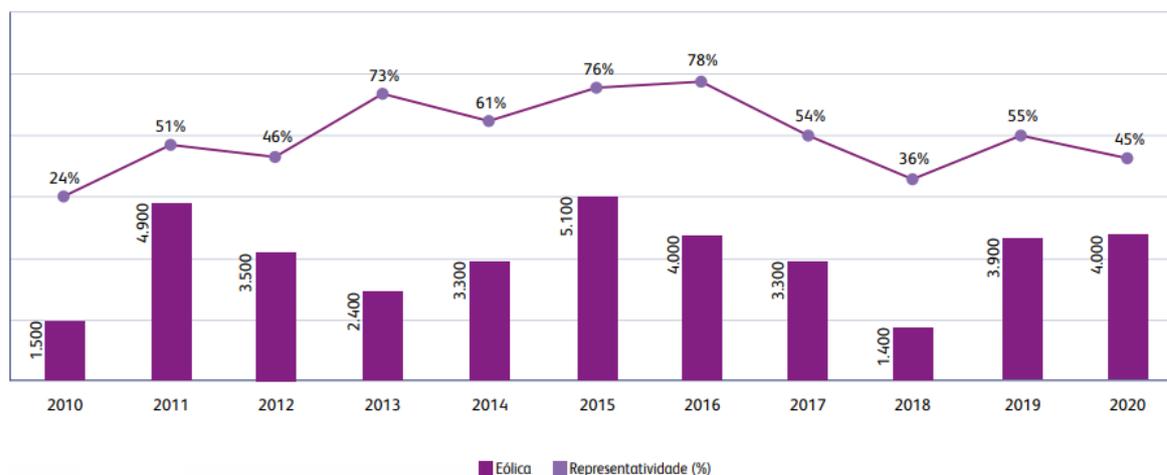
Figura 17 - Número de residências que poderiam ser abastecidas com a energia eólica gerada ao mês.



Fonte: ANEEL / ABEEólica (2021).

2.12.1 Investimentos no Brasil

Também no relatório da ABEEólica de 2020, pode-se avaliar a progressão dos investimentos no setor eólico durante os anos de 2010 a 2020. Percebem-se grandes variações de aporte no setor. A Figura 18 ilustra este tema.

Figura 18 - Investimentos em novos projetos do setor eólico (em milhões de dólares)

Fonte: Bloomberg New Energy Finance – BNEF (2021).

2.13 Impacto Socioambiental

A fonte eólica de energia é uma das que se encaixam melhor no que se refere à sustentabilidade, pois, além de renovável, não produz gases tóxicos (em especial o CO₂) e possui baixo impacto ambiental (e este ainda pode ser mais reduzido com tecnologias) (ABEEÓLICA, 2021; BRASIL ENERGIA, 2021).

O total de emissões evitadas em 2020, por conta da produção de energia eólica, foi de 21,2 milhões de toneladas de CO₂ (ABEEÓLICA, 2021). Diante desta preocupação ambiental em reduzir a emissão de carbono e outros gases na atmosfera, diversos acordos foram assinados. Entre eles, o grande guia atual em relação a isto é o Acordo de Paris, no qual as principais economias mundiais se comprometeram com metas globais. Segundo relatórios de agências internacionais, como a “Global Energy Transformation: a roadmap to 2050”, as energias renováveis precisam crescer pelo menos seis vezes mais rápido para que o mundo atinja as metas propostas no acordo (BRASIL ENERGIA, 2021).

Segundo projeções da IEA, a expansão das energias renováveis em geral deve ser de, em média, 12% ao ano entre 2021 e 2030 para chegar aos níveis propostos. E isso corresponde a uma aceleração importante do setor, já que em 2020 o crescimento de fontes renováveis de energia foi de 7,1%. Dentro desta proporção, um terço é referente às energias solar e eólica (IEA, 2021).

O cumprimento das metas de emissão de carbono tem influenciado também o comércio de Certificados de Energia Renováveis. Cada um deles equivale a 1 MWh de energia gerada no sistema e injetada no sistema por um empreendimento por um

certo período. No Brasil, o número destes certificados vem em uma crescente: de 244 em 2014, para 4 milhões em 2020, com previsão de 8 milhões em 2021. Dos 206 empreendimentos cadastrados para emitir os certificados, 127 são de energia eólica (BRASIL ENERGIA, 2021).

Uma ferramenta criada pelo Conselho Mundial de Energia para avaliar a capacidade de um país em promover o uso de fontes sustentáveis é o trilema energético. Ele é composto de três variáveis: segurança energética (necessidade de importação, variedade da matriz e capacidade de armazenamento), equidade energética (acesso da população e preços) e sustentabilidade ambiental (emissões de carbono *per capita*). Em 2021 o Brasil ocupa a posição de número 26, e levando-se em consideração apenas a América Latina fica em segundo lugar. Os critérios em que perde pontos estão relacionados aos altos preços de energia e importação parcial. É interessante destacar que no quesito sustentabilidade ambiental o Brasil apresenta o 6º lugar mundial (WORLD ENERGY COUNCIL, 2021).

A médio e a longo prazo, além da redução da emissão de carbono (que por si só já é uma grande vantagem), a expansão dos parques eólicos leva ao desenvolvimento regional econômico e social. E isto já pode ser observado, especialmente por ela levar os investimentos a locais previamente remotos do Brasil (GANNOUM, 2021).

Vantagens socioambientais da implantação de parques eólicos (ABEEÓLICA, 2021; BRASIL ENERGIA, 2021):

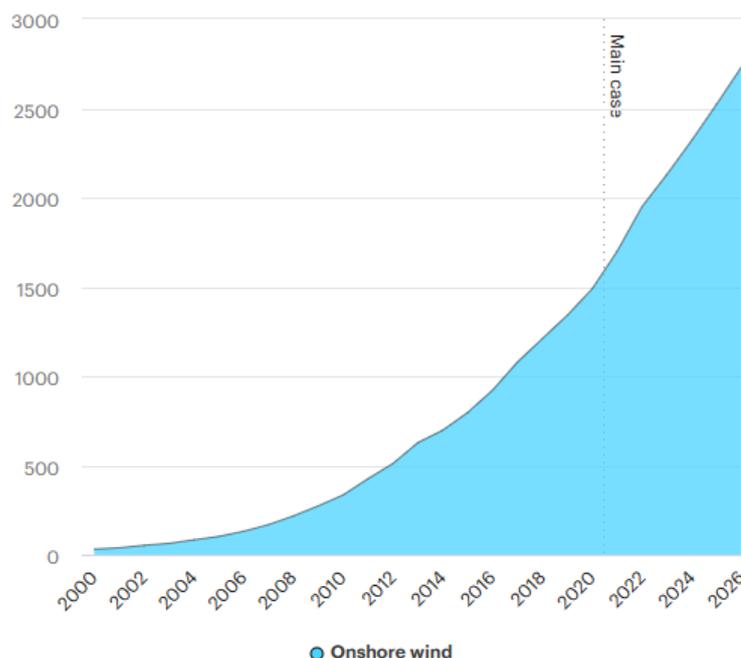
- Gera renda e melhoria de vida para os proprietários de terra com arrendamento para colocação de torres;
- Regularização fundiária aos proprietários de terras;
- Atração de investimentos e programas de desenvolvimento locais para as áreas dos parques eólicos;
- Permite que se mantenha plantações e criações de animais nas terras;
- Contribuição para cumprimento dos acordos de clima internacionais;
- Custo-benefício na tarifa de energia;
- Ausência de emissão de CO₂;
- Capacitação de mão de obra local.

2.14 Perspectivas futuras

É um fato que a demanda energética tende a aumentar com o passar do tempo. A transformação e o desenvolvimento de tecnologias para otimizar a geração energética é um dos grandes desafios do setor nos próximos anos (GADONNEIX et al., 2013).

O uso de energias renováveis cresceu 3% em 2020, e a tendência é de aumentar ainda mais nos próximos anos. Projeções internacionais demonstram que o potencial de crescimento da energia eólica é enorme. A Figura 19, retirada do relatório da IEA “Renewables 2021 – Analysis and forecast to 2026”, demonstra a evolução de 2000 a 2020 e uma projeção para 2026 da produção mundial de energia eólica. A partir disso fica clara a evolução recente e rápida e as tendências futuras (IEA, 2021).

Figura 19 - Geração de energia eólica *onshore* no mundo de 2000 a 2026 (em TWh)



Fonte: IEA (2021).

Ao comparar todas as energias renováveis, pode-se perceber que a eólica foi a que possuiu a maior taxa de crescimento de 175 TWh em 2019-2020 para 275 TWh em 2020-2021 (IEA, 2021).

Outro dado relevante trazido pelo relatório da IEA é que a previsão de capacidade *offshore* de 2026 é cerca de 3 vezes maior que a atual, e acredita-se que nesta data ela já representa um quinto da geração global de energia eólica. Esta expansão é esperada especialmente pela Europa e pela China (IEA, 2021).

Segundo a ABEEólica, o potencial eólico do Brasil é de 744.95 MW, especialmente no Norte e no Nordeste. Isso significa que o país tem o dobro do volume de ventos quando comparado à média mundial e menor oscilação de velocidade (ABEEÓLICA, 2021; SAMPAIO; BATISTA, 2021).

Em fevereiro de 2021 foi apresentado no senado um projeto de lei que visa estabelecer usinas *offshore* no Brasil, o que seria um marco para o aumento da exploração do potencial eólico nacional. Previamente, em setembro de 2020, já havia sido assinado um acordo para que a primeira usina no mar fosse no estado do Rio Grande do Norte. A ideia deste projeto é a produção de 3,1 MW por ano a partir de 52 aerogeradores (MESQUITA, 2021a, 2021b).

A última edição do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2026) aponta que a expansão do setor tende a tornar a energia eólica responsável por 16,14% (28.470MW) até 2026 (SAMPALIO; BATISTA, 2021).

Importantes vantagens da energia eólica como empreendimento foram definidas por Garbe, Mello e Tomaselli em 2011 e são:

- Sua instalação demora uma média de 18 meses para ser concluída (sendo que as demais fontes de geração têm média de 24 meses até o estabelecimento dos parques);
- Com o desenvolvimento tecnológico (crescimento do setor produtivo e implementação de turbinas) e redução do custo dos equipamentos a tendência é que os custos sejam reduzidos cada vez mais e ela se torne cada vez mais competitiva no mercado;
- Incentivos fiscais crescentes por parte dos governos.

Contudo, alguns fatores negativos têm trazido dúvidas em relação ao aumento da parcela de energia eólica na matriz energética brasileira. Entre eles destaca-se principalmente a inconstância temporal e imprevisibilidade relativa dos ventos, ou seja, há vários fatores que influenciam a qualidade e quantidade dos ventos e, a longo prazo, alguns destes fatores estão sujeitos a mudanças e variações incontroláveis. Diante deste principal argumento, questiona-se a viabilidade de confiar na energia eólica em maior proporção (SAMPALIO; BATISTA, 2021).

Atualmente, no setor de geração de energia, muito se fala acerca de “transição energética”, que se trata do processo de mudança entre cenários A e B, sendo um cenário A de energias não ou pouco renováveis e de grande impacto ambiental e sendo o cenário B o de fontes renováveis e sustentáveis. Porém, um conceito a ser

considerado também é o de “transformação energética”, que se trata de algo mais abrangente e envolve o desenvolvimento tecnológico associado à evolução do uso das novas fontes e suas consequências para o coletivo social (GANNOUN, 2021).

3 IMPLEMENTAÇÃO DO PARQUE EÓLICO

A partir das propriedades físicas da geração de energia elétrica pelos ventos, pode-se definir as etapas necessárias para a implementação de um parque eólico. Apesar da geração se dar a partir dos aerogeradores, diversas condições físico-climáticas, políticas e ambientais devem ser atendidas, assim como construções e edificações auxiliares que devem compor o parque.

A etapa inicial do processo se dá a partir do projeto. Como a instalação de uma usina requer a participação de diversos especialistas como pesquisadores, engenheiros e ambientalistas das mais diversas áreas: civil, elétrica, mecânica, ambiental (ELOI, 2012), esse primeiro estágio depende de variados estudos e documentos que deverão se intercomunicar e apresentar a viabilidade de construção do parque.

Para isso, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia, fornece as instruções que estabelecem os requisitos para a apresentação de documentação dos projetos para fins de análise técnica (EPE; MME, 2017).

Antes de se construir de fato um parque, seja ele eólico, solar, ou qualquer outro, deve-se participar dos leilões de compra de energia elétrica para o SIN, em que se definem contratos de comercialização para expansão do complexo energético brasileiro (EPE; MME, 2017). Para a participação em tais leilões, a empresa em destaque deve se cadastrar no sistema da EPE, seguindo os modelos e levantamento de documentação requerida mostrados nos Anexos A e B.

A partir da ficha de cadastramento, deve-se realizar o registro na Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para cadastramento e habilitação técnica do empreendimento com vistas à participação em leilões de energia (EPE; MME, 2017). Em seguida, o Memorial Descritivo deverá incluir os diversos estudos e informações técnicas para demonstrar a possibilidade e disponibilidade da implantação de um parque eólico na área.

3.1 Características gerais do empreendimento

Nessa parte do projeto, indicam-se a localização do parque e os diversos acessos presentes na região, além dos que se fizerem necessários à construção.

Consideram-se as edificações e outros parques próximos já existentes e, assim, definem-se o potencial eólico e condições climáticas da região (EPE; MME, 2017).

Para a análise do potencial de geração, levam-se em conta diversas qualidades de topografia, orografia, vegetação e clima da área. Assim, a disponibilidade de recursos eólicos varia de acordo com as condições geográficas (PINTO, 2012).

Analisar a topografia e a orografia de um terreno é fundamental para avaliar o uso do local para energia eólica. As correntes de ar que circulam a Terra sofrem um atrito ao tocarem sua superfície, que resulta numa força horizontal contrária ao fluxo incidente e decrescente com a altura (PINTO, 2012). Desta forma, deve-se atentar à rugosidade do solo e seu coeficiente de atrito que irá influenciar na passagem dos ventos, além de levar em conta o impacto da altura do vento para determinar sua velocidade.

3.2 Medições eólicas

Assim, estabelecido o local de instalação do parque, é feita a medição dos ventos, sendo, assim, possível estabelecer uma velocidade anual para a geração de energia elétrica (ELOI, 2012). Tais medições consideram não somente a velocidade média anual dos ventos, mas dados como clima, vegetação, edificações existentes, regularidade dos ventos e sujeição a fenômenos climáticos – informações em geral que podem influenciar na disponibilidade de geração eólica do local.

Para tais medições, são utilizadas torres anemométricas, definidas como:

Uma torre metálica, com estrutura tubular ou treliçada, de perfil triangular ou quadrado, estaiada ou autoportante, instrumentada com os sensores de medição, com sistemas de alimentação de energia, de aquisição de dados, de proteção contra descargas atmosféricas e de transmissão de dados (GSM, satélite, rádio, SCADA, outro) (PINTO, 2019 p. 15).

De acordo com a Nota Técnica DEA 08/14 da EPE (Instruções para as medições anemométricas e climatológicas em parques eólicos), definem-se instruções referentes às medições anemométricas. Dela, vale ressaltar que todo parque deve possuir, independente da potência instalada, pelo menos, uma estação de medição e registro de dados anemométricos e climatológicos (EPE; MME, 2014).

Para o projeto e instalação da torre anemométrica, deve-se atender às seguintes Normas Técnicas e publicações:

- a) IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY: 11. Wind speed measurement and use of cup anemometry; 1. Edition; Glasgow; 1999.
- b) MEASNET: Cup Anemometer Calibration Procedure; Version 1; Sep 1997.
- c) IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION: Wind turbines - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines (IEC 61400-12-1:2005); 2005.
- d) MEASNET: Evaluation of site-specific Wind conditions; Version 1, Nov 2009; e
- e) MINISTÉRIO DA DEFESA, Comando da Aeronáutica – Portaria Nº 256/GC5, de 13 de maio de 2011.

Desta forma, um padrão de configuração adotado pela Nota é de conter:

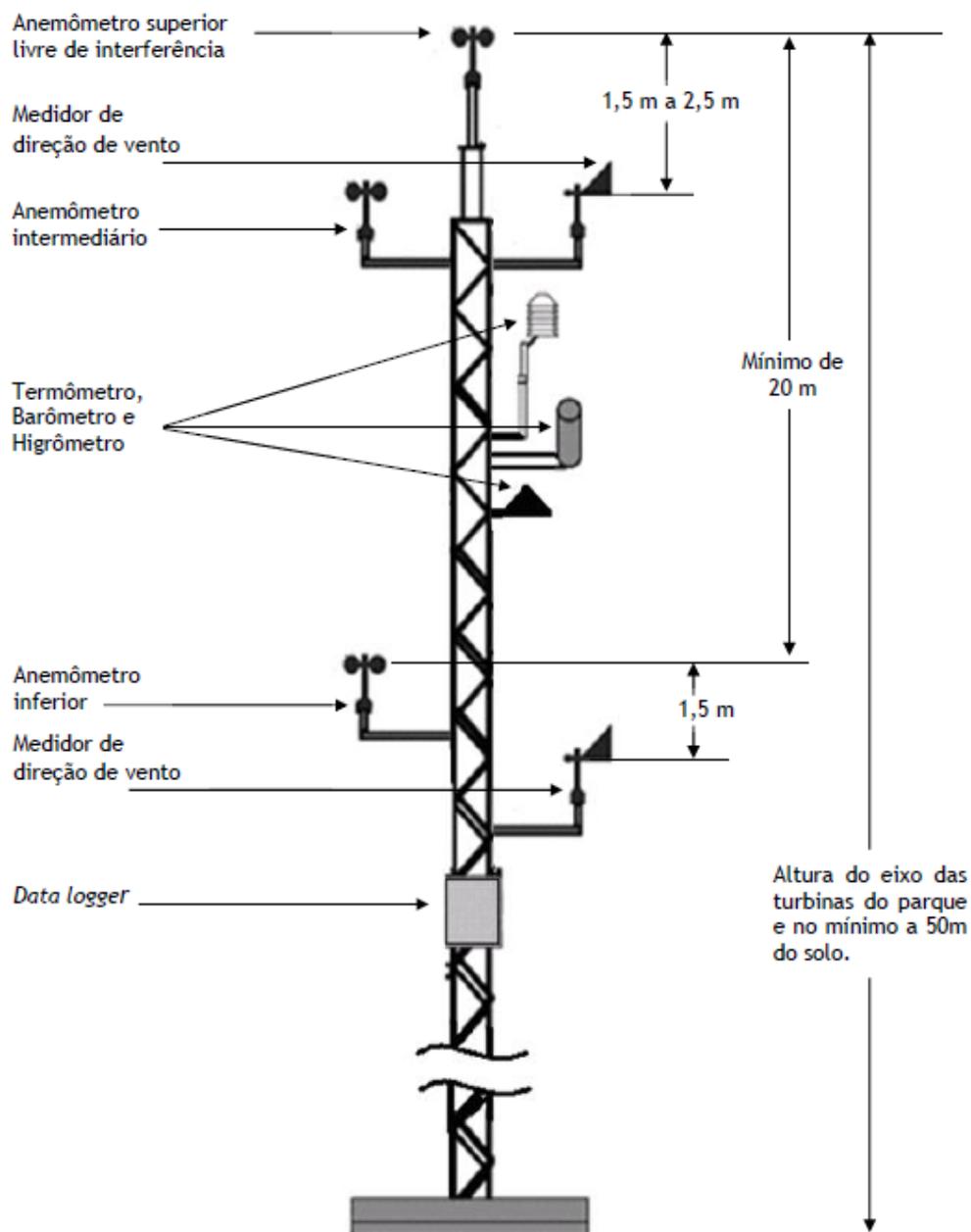
- 03 (três) anemômetros de concha;
- 02 (dois) medidores de direção dos ventos (“*wind vanes*”);
- 01 (um) medidor de umidade do ar;
- 01 (um) medidor de pressão barométrica; e
- 01 (um) termômetro.

E, seguindo-se o padrão, o posicionamento dos equipamentos deve estar em conformidade com as recomendações das Normas supracitadas e sugere-se, com exemplo na Figura 20, a distribuição dos instrumentos de medição na torre:

- a) Um anemômetro deverá ser instalado no topo da estação de medição (anemômetro superior), em altura do solo igual à do eixo das turbinas do parque eólico e, no mínimo, a 50 (cinquenta) metros de altura do solo;
- b) O anemômetro superior deve estar livre de perturbações e interferências causadas por outros instrumentos de medição ou de sinalização;
- c) O segundo anemômetro (anemômetro intermediário) deve ser instalado à distância de até 2,5 (dois vírgula cinco) metros abaixo do anemômetro superior;
- d) O terceiro anemômetro (anemômetro inferior) deve ser instalado à distância mínima de 20 (vinte) metros abaixo do anemômetro superior e, preferencialmente, na altura inferior da ponta da pá das turbinas;

- e) O medidor superior de direção de vento deve ser instalado à distância mínima de 1,5 (um vírgula cinco) metros abaixo do anemômetro superior e máxima de 10% da altura do eixo das turbinas do parque eólico;
- f) O barômetro, o medidor de umidade relativa do ar e o termômetro devem ser instalados preferencialmente entre 1,5 metros e 10 metros abaixo do topo da estação de medição;
- g) A estação de medição deve ter sua verticalidade verificada.

Figura 20 - Diagrama para instalação de torres anemométricas de parques eólicos em operação.



Fonte: EPE (2014).

Ainda segundo a EPE (2017, p. 18), destaca-se que as medições devem ser feitas em pelo menos duas alturas distintas, sendo a altura mínima de 50 (cinquenta) metros, por período não inferior a 36 (trinta e seis) meses consecutivos. Deverão também ser informadas:

- Taxas de perda de dados, a metodologia empregada e a base de informações utilizada para o preenchimento das lacunas de medições;

- b) Valores médios de temperatura, densidade média do ar, pressão atmosférica média no local do parque eólico, umidade relativa anual, rugosidade do terreno e altitude, incluindo identificação e localização das estações meteorológicas de origem dos dados, quando não medidos em instrumentos da torre anemométrica em estudo;
- c) Distribuição de frequência anual de velocidade do vento;
- d) Avaliação da correlação dos dados de medição local com dados anemométricos de longo prazo (histórico de pelo menos 20 anos), além da descrição da metodologia de ajuste de dados;
- e) Velocidade de referência (V_{ref} , 50 anos, 10 minutos), rajada máxima (V_{e50} , 50 anos, 3 segundos), intensidade de turbulência média ($V > 4$ m/s), intensidade de turbulência Normal (quantil de 90 %) e classe IEC do parque eólico.

3.2.1 Potencial Eólico e Produção Anual de Energia

No cálculo de produção de energia devem ser descontadas várias perdas, para assegurar maior confiabilidade nos resultados da energia elétrica gerada no parque eólico. As principais perdas são: indisponibilidade da turbina eólica, indisponibilidade da infraestrutura (subestação e rede elétrica), perdas elétricas, degradação da pá, restrições técnicas do aerogerador (gestão de parada por setor de direção, devida à carga mecânica) e perdas de ajuste de curva de potência (PINTO, 2019).

Assim, devem ser consideradas as incertezas padrão na estimativa de Produção Anual de Energia (PAE) para curto e longo prazo, abrangendo medições anemométricas, correlação de longo prazo, extrapolação horizontal total, extrapolação vertical total, metodologia de cálculo do efeito esteira, curva de potência da turbina, variabilidade interanual e outras (EPE, 2017).

Para a certificação da PAE, devem também constar os valores de Produção Anual Bruta e Certificada (P50) de cada aerogerador, identificando o fabricante/modelo, torre de referência, velocidade média anual do vento livre, perdas aerodinâmicas e degradação média das pás (EPE, 2017).

3.3 Sistemas de conexão

Em geral, no que se diz respeito à geração eólica, a tensão de geração dos aerogeradores é de 34,5 kV e é escoada para uma subestação, através da rede elétrica, para a elevação de tensão em um nível de transmissão (BENTO, 2017). Desta forma, todo parque eólico deve apresentar uma subestação elevadora com as características dos transformadores elevadores e o arranjo dos barramentos.

A tensão elevada deve seguir a classificação de instalação de transmissão outorgada à concessionária pública de energia elétrica e integrante do SIN (ONS, 2020). Desta forma, a partir de consulta e solicitação de acesso à rede, o empreendimento pode estabelecer um cronograma de entrada em operação e a solicitação do ponto de conexão a partir de estudos de integração às instalações de transmissão. Mais detalhes podem ser encontrados no Guia do Acessante ao Sistema de Transmissão, disponibilizado pelo ONS.

A apresentação do documento de conexão do parque na rede deve ser feita por memoriais descritivos e diagramas unifilares expondo os dados e informações supracitados.

3.4 Locação e desenhos de projeto

Deverá ser apresentado um desenho de localização, em formato “dwg”, no sistema de projeção UTM (Universal Transversa de Mercator), incluindo a grade de coordenadas e a indicação do meridiano central do fuso, com coordenadas vinculadas ao referencial geodésico brasileiro – SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) (EPE, 2017).

Os desenhos de locação deverão conter a poligonal perimétrica do parque eólico, indicando as diversas matrículas nos Registros Gerais de Imóveis (RGI) para adequação e possível arrendamento de terra com os proprietários. Caso haja outras usinas energéticas nas proximidades, estas também deverão estar sinalizadas nos desenhos de localização (EPE, 2017).

Deverão ser indicadas as localizações de: aerogeradores, torres anemométricas, subestações, estradas e acessos, rede de distribuição e as demais edificações do parque – todos identificados com as respectivas coordenadas UTM.

3.5 Documentações legais e licenças ambientais

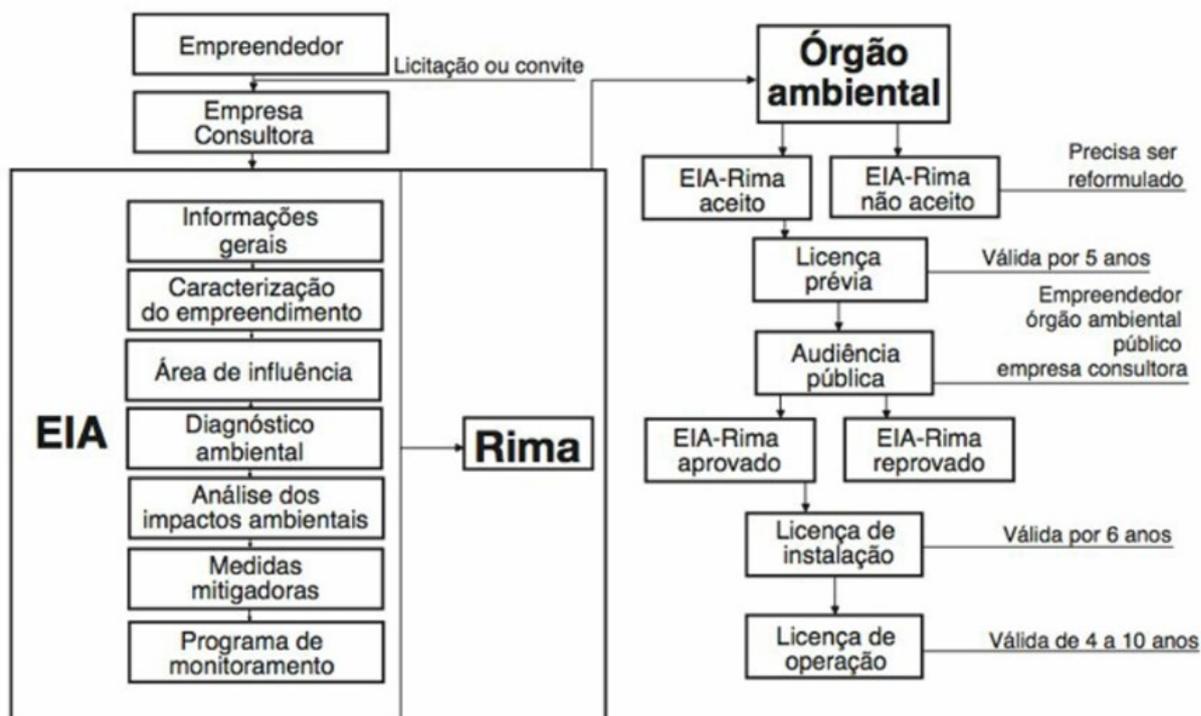
Deverão ser apresentadas as Anotações de Responsabilidade Técnica (ART) dos profissionais e empresas que participaram da confecção dos projetos supracitados. Também deverão ser apresentadas as Licenças Ambientais, compatíveis com as características técnicas do projeto e com a etapa do processo de licenciamento, devendo estar em conformidade com a legislação ambiental vigente e emitida por órgão competente (EPE, 2017).

O estudo prévio de impacto ambiental (EIA) e o relatório de impacto ambiental (Rima) são instrumentos da política brasileira do meio ambiente, instituídos pela Resolução 001/86 do Conama, que conceitua impacto ambiental como:

Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente causada por qualquer forma de matéria ou energia e resultante das atividades humanas que direta ou indiretamente afetam a segurança, a saúde, o bem-estar, as atividades socioeconômicas, a biota, as condições estéticas e sanitárias e a qualidade dos recursos ambientais (PINTO, 2012).

Desta forma, um parque eólico pode ser considerado como causador de baixo impacto ambiental, porém ainda sim é fruto de intervenção ao meio ambiente e, portanto, deve estar sujeito a um licenciamento ambiental. A seguir, um exemplo das etapas de obtenção do licenciamento ambiental conforme mostra-se na Figura 7.

Figura 21 - Etapas do processo de obtenção de licenciamento ambiental



Fonte: Pinto (2012).

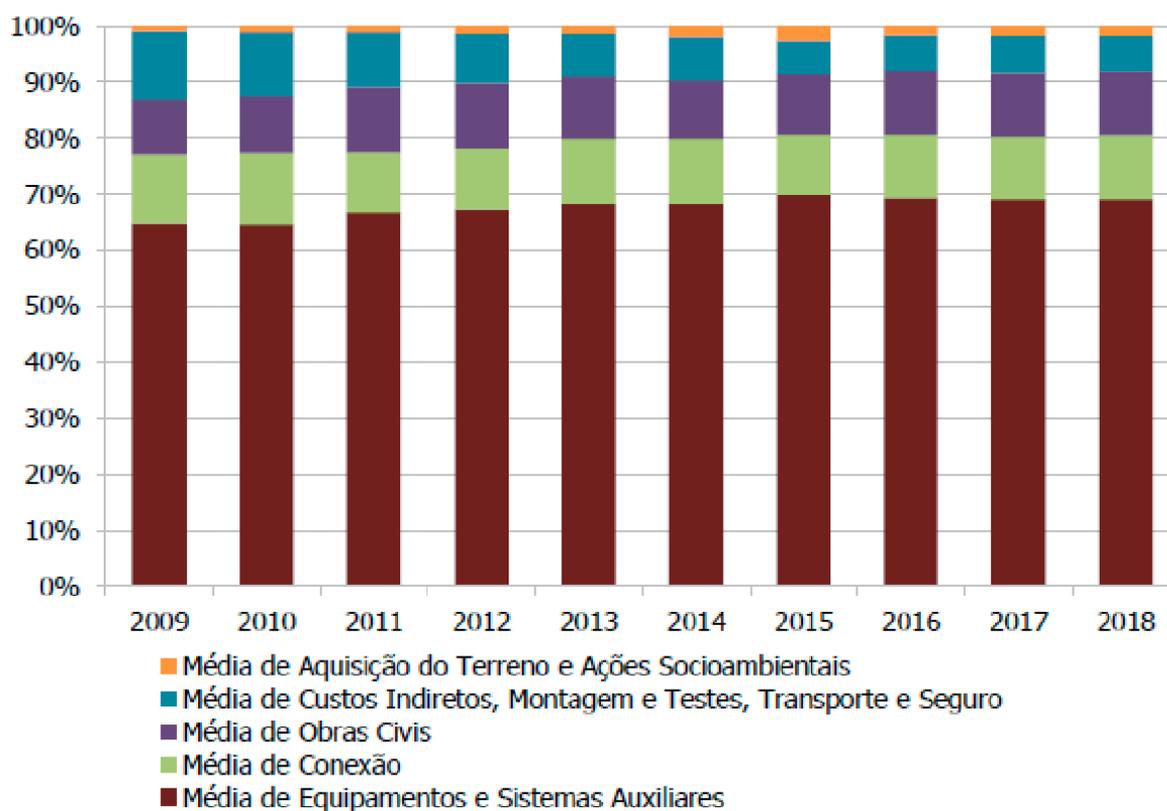
Para fins de habilitação técnica nos leilões de energia deverá ser obrigatoriamente apresentado o Parecer de Acesso, a Informação de Acesso ou um documento equivalente para acesso às instalações de Rede Básica ou Demais Instalações de Transmissão (DIT) (EPE, 2017).

4 CUSTO DE IMPLANTAÇÃO DO PARQUE EÓLICO

Tendo em mente as etapas de construção do parque eólico, faz-se relevante verificar os custos de sua implantação. Enquanto, na última década, a qualidade e o tamanho dos aerogeradores aumentaram, nota-se uma queda substancial quanto ao custo de fabricação das turbinas e custos associados de construção dos parques. Desde 2008, o preço das commodities e o elevado índice de nacionalização dos equipamentos permitiu um impacto significativo na variação cambial nos custos dos empreendimentos (EPE, 2018).

Desta forma, de acordo com dados da EPE, pôde-se levantar a divisão média dos custos de investimentos em projetos por categoria de custos, como se observa na Figura 22, a seguir.

Figura 22 - Peso relativo dos custos no orçamento total dos projetos



Fonte: EPE (2018).

Como mostrado acima, os maiores custos estão relacionados aos equipamentos e sistemas auxiliares (com quase 70% da participação total), o que é

de se esperar considerando que esta é a parcela que de fato é responsável pela geração de energia dos parques.

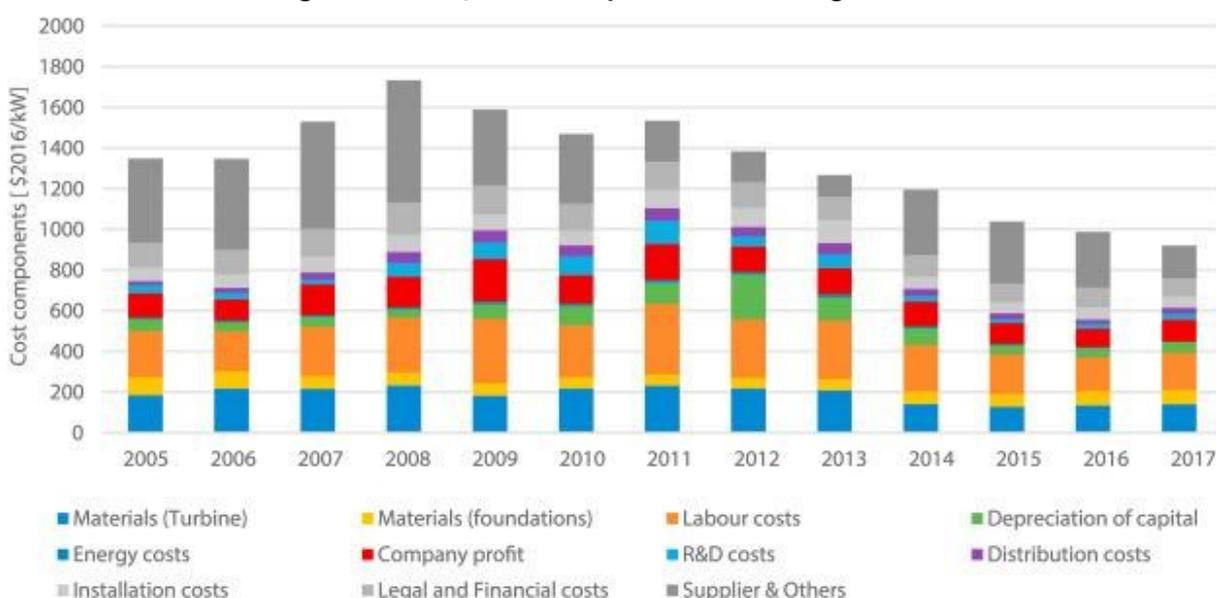
A seguir, será desenvolvido mais detalhadamente o que cada categoria de custo aborda.

4.1 Custos de Equipamentos e Sistemas Auxiliares

Para contextualização, de acordo com o Relatório de Resultados Consolidados de Leilões da CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica) de março de 2022, 186 parques eólicos foram à leilão, sendo todos localizados na região Nordeste, mais especificamente, nos estados da Bahia, Rio Grande do Norte e Pernambuco. Desta forma pode-se levar em conta o fornecimento de turbinas da marca *Vestas*, uma das pioneiras e maiores investidoras de projetos eólicos no Brasil, com modelos de 4,2 – 4,5 MW (FRATA, 2020).

Para definição do custo dos aerogeradores, podem ser levados em consideração alguns fatores, como: materiais, custos com energia, labor, instalação e distribuição, pesquisa e desenvolvimento, depreciação de capital, fornecedores e lucro da companhia (ELIA, A. et al., 2020). Como mostra a Figura 23, a distribuição de tais custos, que vem sofrendo drástica redução total, pode ser dada por uma relação de preço por potência do aerogerador em questão.

Figura 23 - Preço das componentes de aerogeradores



Fonte: ELIA, A. et al. (2020).

Nos custos de materiais, podem-se destacar o aço, o concreto, o alumínio, a fibra de vidro e polímeros como a resina epóxi. O primeiro e o segundo podem ser encontrados na torre, a maior parte da turbina eólica, que serve para dar sustentação ao restante do equipamento e, portanto, deve ser resistente e durável. Já os três últimos podem ser encontrados nas pás dos aerogeradores, que devem ser fabricadas com materiais leves e resistentes (WINDBOX, 2020). Somados, esses materiais compõem quase 90% das matérias-primas necessárias para construção do aerogerador (ELIA, A. et al., 2020).

Os custos de labor e P&D são, como o nome sugere, a mão-de-obra necessária para o processo. Desse, são levados em conta a participação de todo o corpo profissional desde a pesquisa da tecnologia até a fabricação própria do equipamento.

A instalação e distribuição dos equipamentos variam principalmente de acordo com a localização do parque. Com a presença de fábricas e montadoras em solo nacional¹, esta parcela pode diminuir consideravelmente, devido à redução do frete de cargas de grande porte (como a nacela).

A depreciação capital refere-se ao fato de que conforme um bem é utilizado ao longo do tempo ele vai perdendo seu valor, ou seja, o valor desse bem fica depreciado. Na prática, os bens se desgastam naturalmente ao longo do tempo e vão ficando obsoletos (REIS, 2018). Aliado a isso, devem ser levados em consideração os lucros da empresa, que variam entre 8 e 13% da parcela de custos (ELIA, A. et al., 2020).

Embora os custos de energia sejam uma pequena parcela dos preços totais das turbinas eólicas, o uso reduzido de energia por kW e os preços mais baixos de geração contribuíram para a redução dos custos gerais das turbinas (ELIA, A. et al., 2020). Portanto, as políticas que buscam alcançar a redução de custos da tecnologia precisam ser adequadamente desenhadas para diferentes estágios de desenvolvimento da tecnologia alvo.

É nítido que o custo do aerogerador aumenta à medida que o tamanho da turbina aumenta, embora haja benefícios em usar uma quantidade menor de turbinas maiores – a complexidade e a construção do local geral da fazenda são bastante

¹ Foi inaugurada no dia 12/11/2019 uma nova fábrica de turbinas eólicas da Vestas, que já possuía uma fábrica de nacelas na região, no município de Aquiraz, Região Metropolitana de Fortaleza. Fonte: Governo do Estado do Ceará, 2019.

reduzidas com menos turbinas de maior porte –. Existem economias de escala, de modo que as turbinas maiores custam menos por kW instalada do que as menores.

Assim, deve-se levar em conta que os empreendimentos com grandes quantidades de aerogeradores também desfrutarão de ofertas mais vantajosas durante as negociações com fornecedores. Com isso em mente, o custo típico de uma turbina pode chegar a 6,2 milhões de reais² por megawatt (MW) de capacidade de produção de eletricidade do equipamento (BLEWETT, 2021).

4.2 Custos de Conexão, Integração e Rede

Para a dispor-se da energia gerada nas turbinas, é necessária a interligação por redes de média tensão que conectarão os aerogeradores até uma subestação elevadora próxima. Normalmente após o aumento da tensão na rede, a transmissão se dará até uma outra subestação, onde haverá a distribuição da energia. Desta forma, essa integração à rede interligada nacional pode ser categorizada em três componentes: custos de rede; custos de balanceamento; e custos de interação com outras usinas (FURSTENWERTH, D. et al., 2015).

Os custos de rede definem-se pelos gastos necessários para levar a eletricidade até onde ela é exigida. Neste quesito, eles são a principal fonte de despesa de conexão para a implantação do parque. Normalmente, devem-se levar em conta a aquisição de milhares de metros de cabos de energia, comunicação e proteção, bem como os as estruturas de suporte para os cabos.

Além disso, podem incluir os custos de construção de equipamentos de suporte de tensão (por exemplo, compensadores estáticos de reativos, do inglês SVC) ou gerenciamento de fluxo de energia ativo (por exemplo, dispositivos flexíveis de transmissão em corrente alternada, do inglês FACTS). As perdas que ocorrem no transporte de energia podem contribuir nos custos para ambas as redes de distribuição e transmissão (FURSTENWERTH, D. et al., 2015).

Os custos de balanceamento representam os gastos incorridos no balanceamento de desvios da geração real da geração prevista. Seu objetivo é estabilizar o equilíbrio de energia ativa de sistemas elétricos integrados em curtas escalas de tempo. Em sistemas elétricos de circuito alternado, o balanço de

² Valor ajustado de 1,3 milhões de dólares para a cotação do dia 17 de abril de 2022, de 4,70 reais brasileiros. Fonte: Investing.com.

suprimento de demanda deve manter-se a cada instante de tempo para garantir a estabilidade da frequência em 60 Hz, pois desvios de frequência têm várias consequências problemáticas, incluindo destruir mecanicamente as máquinas rotativas, como os geradores (FURSTENWERTH, D. et al., 2015).

Seguidamente, os custos de interação com outras usinas não se mostram necessariamente como gastos durante a implantação, mas como efeitos adversos que podem surgir na rede. Ao introduzir capacidade adicional a um sistema, a produção, bem como as receitas de outras usinas tendem a ser reduzidas. Em contraste com usinas despacháveis, as usinas eólicas produzem eletricidade quando o vento sopra – ou seja, sua produção não reage à demanda por eletricidade e não é constante, mas variável, com uma utilização média comparativamente baixa (FURSTENWERTH, D. et al., 2015).

Desta forma, outras usinas podem precisar fornecer a capacidade necessária em momentos de alta demanda. Além do mais, a estrutura de demanda remanescente será alterada, o que se mostra no aumento da carga residual de um sistema elétrico. Consequentemente, o custo específico do capital investido torna-se maior, o que leva a um aumento no custo médio de geração.

4.3 Custos de Obras e Edificações Civas

Para a construção do parque eólico, deve ser prevista a criação de estradas e acessos que permitam que todo o maquinário em transporte chegue às posições predefinidas dos aerogeradores. Em relação às estradas existentes, em determinados casos, é necessário redimensioná-las em alguns pontos, devido à dimensão dos componentes a transportar (SILVA, B. S. C., 2013) . Já que é comum a presença de turbinas em regiões montanhosas, é preciso um grande trabalho de realocação de solo e planificação.

Além das estradas, tem-se a adequação do solo para a fundação das turbinas. Devido as suas alturas e a necessidade de garantir que as oscilações no topo da torre não afetem o funcionamento do aerogerador, as fundações devem ser dimensionadas corretamente, seguindo diversas variáveis como tipo de solo, geometria e tipo de turbina. Ainda se destacam as plataformas de montagens, valas e travessias dos cabos de média tensão e os edifícios da subestação. Deste último, assemelha-se muito ao projeto de uma moradia, porém com particularidades e especificações mais complexas.

Assim, de acordo com SILVA (2013), a partir de um estudo econômico feito pelo mesmo em um parque eólico de Portugal (ver Anexo C), pode-se concluir que, dos gastos com a operação civil, metade são previstos para a subestação. Cerca de 1/6 do total é destinado à fundação dos aerogeradores e pouco menos que isso é designado às estradas e acessos.

4.4 Outros Custos

Por fim, os últimos 10% gastos na implantação do parque podem ser designados para as demais atividades. A montagem das turbinas requer uma vasta equipe de técnicos capacitados para a atividade, além de maquinário adequado para transporte e instalação dos aerogeradores.

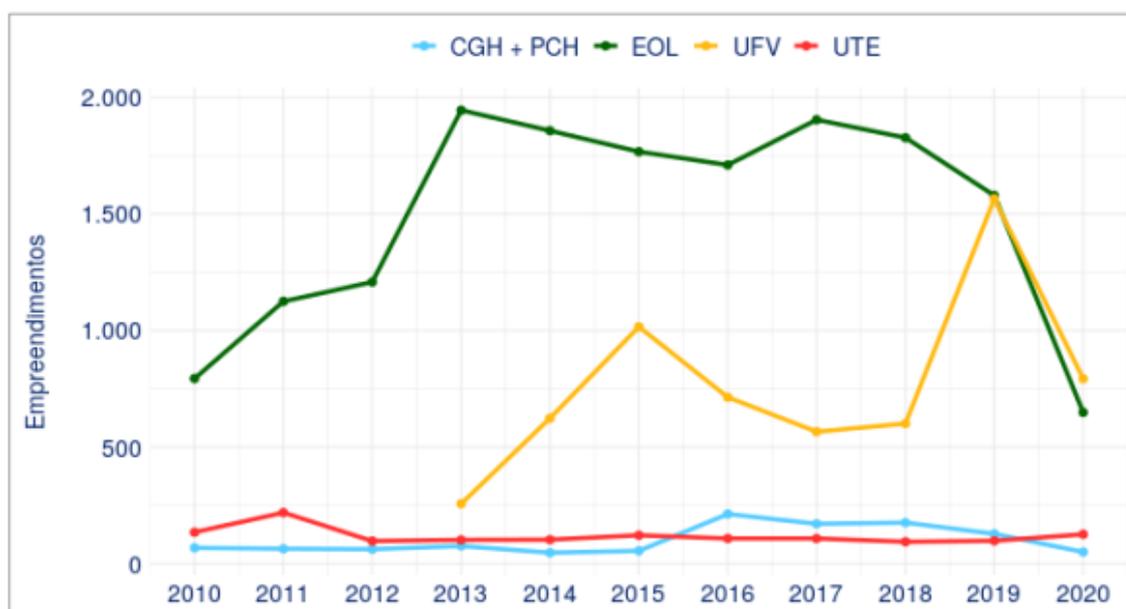
Aqui pode-se destacar também os gastos com projetos. As equipes contratadas, normalmente terceirizadas, realizarão o planejamento e programa para a implementação do parque. Desta forma, considerando o escopo complexo e extenso, diversas áreas de estudo serão analisadas e convocadas para a realização correta do empreendimento.

Por fim, mas não menos importante, salienta-se a aquisição dos documentos e licenças socioambientais conforme apresentadas no capítulo anterior. E ainda, têm-se os custos de aquisição e arrendamento de terrenos.

5 CUSTO DA ENERGIA E COMPETITIVIDADE NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

O investimento em energia eólica no Brasil é bem relevante. Através do Sistema de Acompanhamento de Empreendimentos Geradores de Energia Elétrica – AEGE, criado pela EPE, foi possível obter, que apenas entre 2010 e 2020, foram cadastrados mais de 10 mil projetos desse tipo de geração. Especificamente em 2013, conforme visto na Figura 24, cerca de 2 mil projetos voltados a energia eólica (EOL) foram cadastrados no sistema AEGE da EPE (DE AGUIAR et al., 2021).

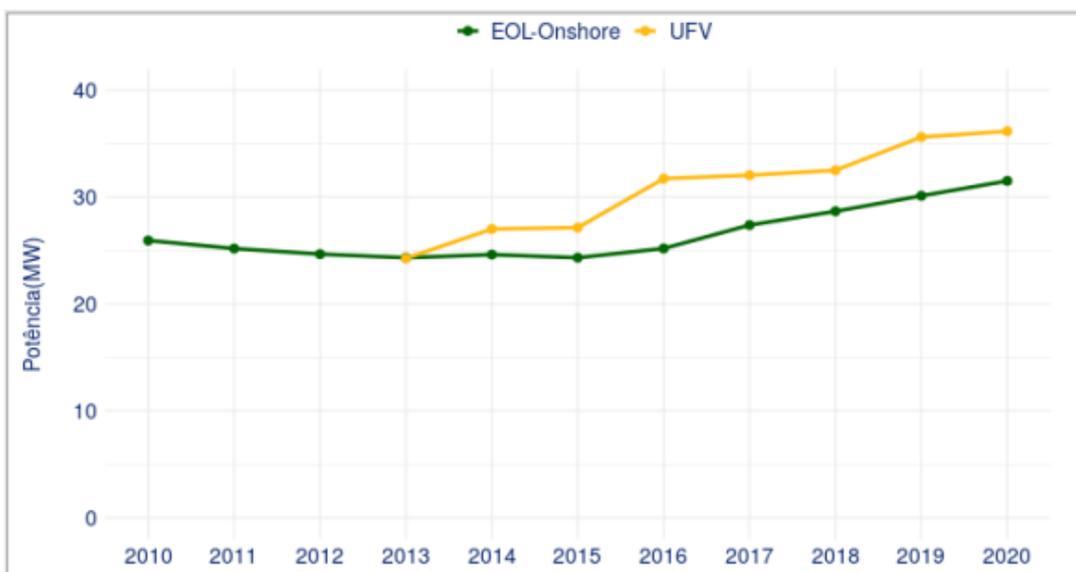
Figura 24 - Evolução do número de projetos cadastrados por fonte



Fonte: De Aguiar (2021).

Complementarmente, foi constatado um aumento da capacidade de potência instalada com o decorrer dos anos analisados na Figura 25. Deve-se a isso, o cancelamento da limitação de potência para a aplicação do desconto da Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão e da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição em 2016, que anteriormente, era limitado a 30 MW. Adicionalmente, na Figura 25, pode-se verificar o nítido crescimento da potência média instalada das usinas fotovoltaicas e da energia eólica *onshore* a partir de 2016, quando há a primeira ultrapassagem do limite pré-estabelecido para os descontos vistos (DE AGUIAR et al., 2021).

Figura 25 - Capacidade média da potência instalada dos projetos de Geração eólica e fotovoltaica.

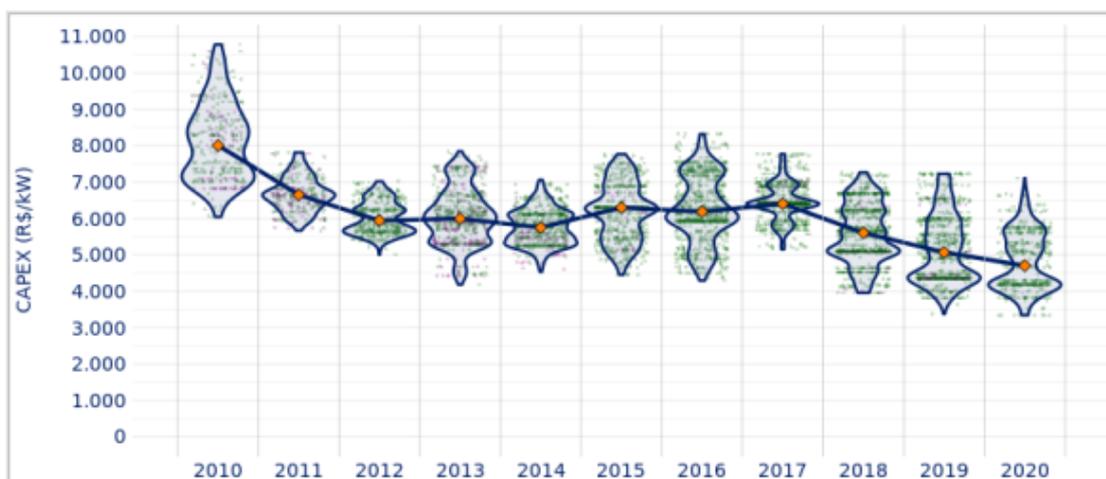


Fonte: De Aguiar (2021).

O CAPEX (do inglês, *capital expenditure*), indica o capital de investimento para a realização do empreendimento do parque eólico em reais, por kW (REIS, 2018).

Na Figura 26, nota-se que o valor médio de investimento para a implantação de um parque eólico caiu para quase metade do preço do ano inicial do estudo (2010). Esse decréscimo foi resultante da maturidade adquirida pela geração eólica *onshore* no Brasil e no mundo, pois os custos de mão de obra especializada caíram em relação a potência implantada no parque de geração eólica, além do aumento da potência de cada aerogerador, devido à evolução tecnológica.

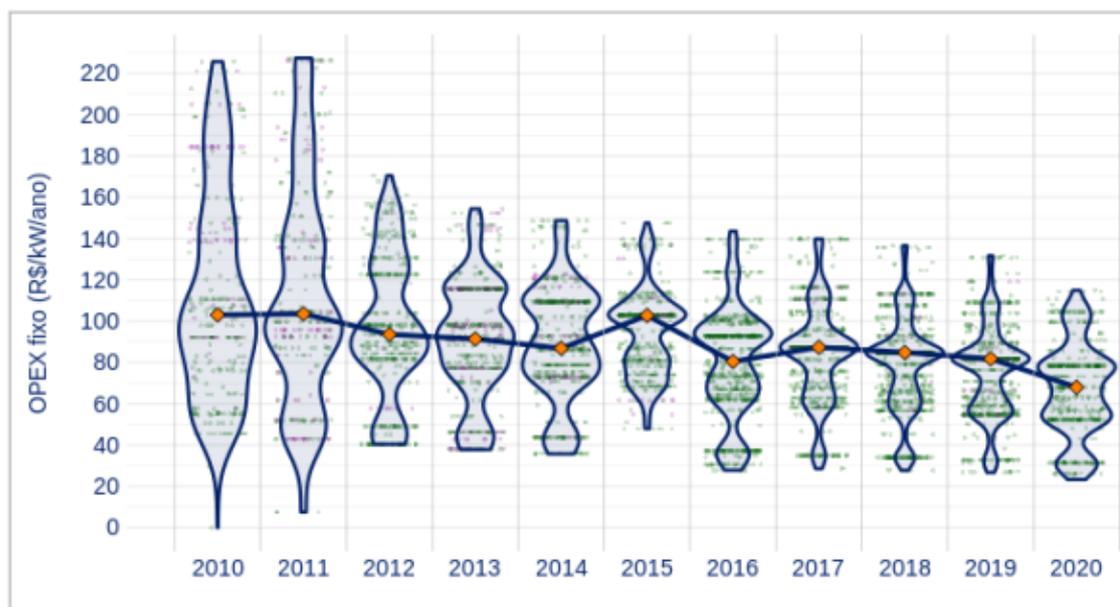
Figura 26 - Evolução dos preços de CAPEX da fonte eólica.



Fonte: De Aguiar (2021).

Conforme se vê na Figura 27, o preço médio da Operação e Manutenção (O&M) dos parques caiu para cerca de R\$ 60,00/kW.ano em 2020. Preço cerca de 40% menor do que o preço inicial de O&M no início do estudo, que era próximo de R\$ 100,00/kW.ano.

Figura 27 - Evolução dos valores de Operação e Manutenção da fonte eólica



Fonte: De Aguiar (2021).

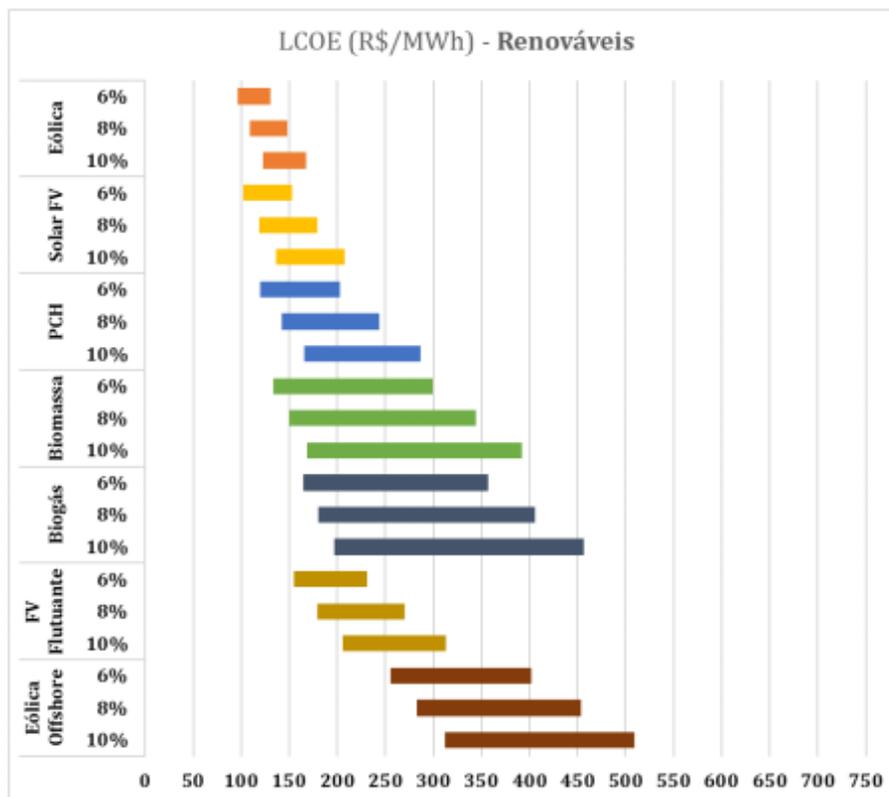
5.1 Custo Nivelado de Energia (LCOE)

Para a comparação de diversas fontes de energia, foi criado como indicador o LCOE, que oriundo do inglês *Levelized Cost of Energy*, este indicador traz como combinação os custos de O&M, de CAPEX, de combustível e desempenho do tipo de geração de energia elétrica. Entretanto, esse indicador não contempla os encargos, depreciação dos equipamentos, entre outros aspectos relevantes para a análise completa de viabilidade do tipo de geração de energia a ser utilizado (DE AGUIAR et al., 2021).

Na Figura 28, é possível notar que as fontes mais vantajosas através do parâmetro LCOE são: eólica e solar. Embora não seja foco desse estudo, vale frisar que a energia térmica apresenta um LCOE muito ruim comparado às energias renováveis. Entretanto, ressalta-se a importância na confiabilidade do fornecimento

de energia dessas fontes térmicas, que apesar de poluentes e caras, são necessárias para a manutenção do sistema elétrico nacional (DE AGUIAR et al., 2021).

Figura 28 - Faixa de valores de LCOE para a fonte eólica e demais fontes renováveis



Fonte: De Aguiar (2021).

5.2 Pontos Relevantes em Relação à Expansão da Energia Renovável

A expansão da geração renovável de energia, em âmbito mundial, deve-se, entre outros, a (GORINI, 2018):

- Transição energética em andamento: tecnologia de geração renovável evoluiu e está mais competitiva em relação aos outros tipos de geração;
- Diversificação: todas as fontes ER tiveram decréscimo de seus respectivos preços de implantação;
- Estabelecimento de políticas públicas para a utilização desse tipo de energia;
- Leilões que incentivam a competição entre as fontes de energia;
- Crescente economia de escala na fabricação de componentes;
- Melhorias nos processos produtivos;

- Aperfeiçoamento tecnológico;
- Cadeias de suprimentos mais competitivas;
- Desenvolvedores mais experientes: maior padronização e agilização nas entregas;
- Uso de estatística e monitorização em tempo real para O&M;
- Dinâmica surpreendente: os custos de eletricidade da geração de energia caíram para os novos projetos encomendados em 2017;
- Transição da matriz energética global: abandono dos combustíveis fósseis e investimento nas fontes renováveis.

Como consequência (GORINI, 2018):

- A capacidade eólica global acumulada instalada cresceu cerca de 15% ao ano entre 2000 a 2016;
- A queda do preço médio das turbinas eólicas é de 40% desde 2008;
- Brasil com fator de capacidade médio de geração acima de 45%, enquanto no mundo é abaixo de 40%;
- LCOE médio de US\$ 0,06/kWh em 2017, corte de 22% em relação à 2010;
- Preços de geração de energia eólica *onshore* por volta de US\$40/MWh;
- O custo de implantação entre 2010 e 2016 dos parques eólicos caiu por volta de 50% em todas as regiões do mundo;
- A Energia Eólica possivelmente alcançará a liderança global em geração de energia em 2050, com 36% da capacidade global;
- Investimento próximo de US\$ 150 bilhões/ano pelos próximos 30 anos apenas na modalidade eólica *onshore*.

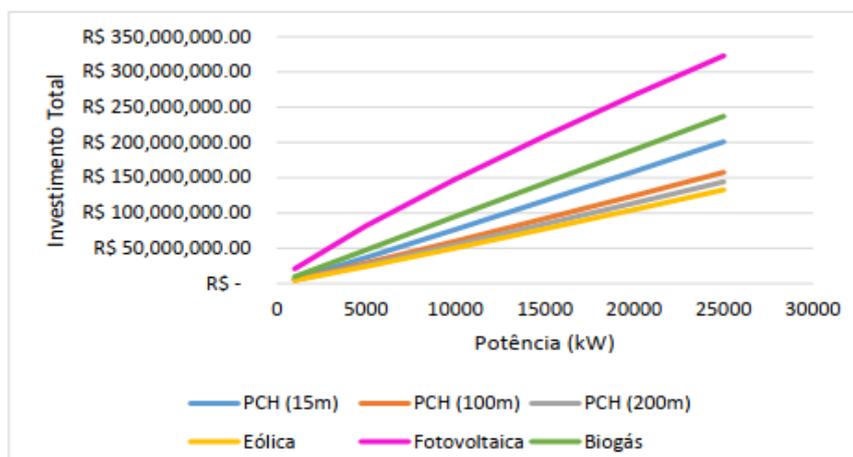
Conforme a apresentação da IRENA – Custos de Geração de Energia Renovável, realizado por Ricardo Gorini, pode-se perceber que o custo da geração de eletricidade a partir dessas fontes sustentáveis tendem a cair mais, mesmo com o crescente aumento de implantação. Adicionalmente, a apresentação ressalta que os custos de geração dessas fontes chegaram ao patamar das fontes que utilizam combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica. Com isso, tem-se um mercado promissor e de grandes proporções para o futuro da energia renovável.

5.3 Relação Potência x Investimento

Para qualquer tipo de análise atrelada ao custo de um empreendimento, é necessário levar-se em consideração dois parâmetros essenciais: custo da implantação e o retorno do projeto. No caso da análise de geração de energia elétrica, o retorno é medido pela quantidade de energia possível de se gerar naquele local, ou seja, a especificação da potência da usina.

Analisando a Figura 29, pode-se perceber que no ano de 2016, a energia eólica já apresentava o melhor custo de investimento em relação a potência instalada. Como consequência, sua implantação no cenário nacional foi facilitada em relação às outras energias renováveis (RANGEL; BORGES; DOS SANTOS, 2016).

Figura 29 - Gráfico de Potência (kW) x Investimento (R\$) por fonte de energia



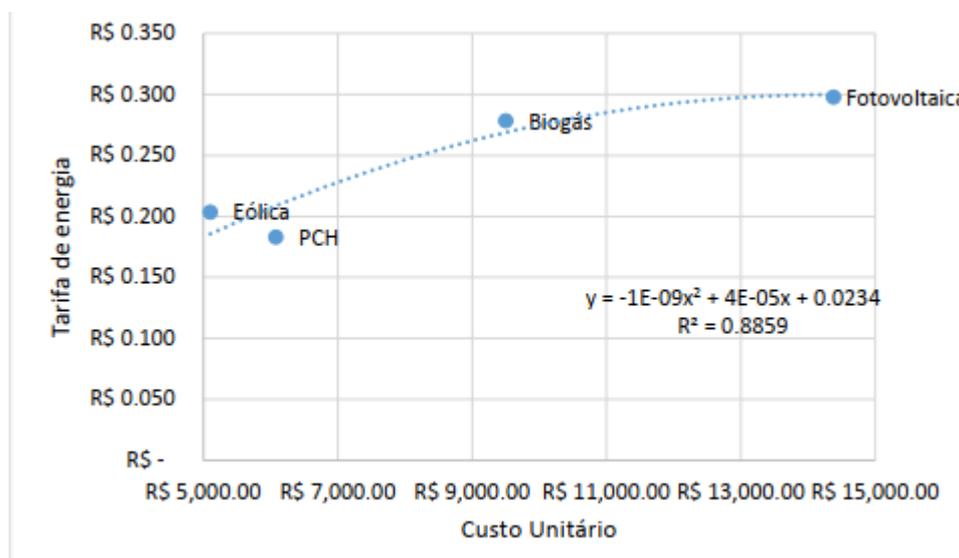
Fonte: RANGEL; BORGES; DOS SANTOS (2016).

Ressalta-se que, apesar de recente, esse gráfico já estaria desatualizado. Hoje, por exemplo, a energia fotovoltaica não apresenta uma relação conforme apresentada no gráfico. Essa fonte foi uma das mais desenvolvidas nos últimos anos, expandiu em todo mundo, a tecnologia das placas fotovoltaicas evoluiu bastante, o custo de instalação e manutenção caiu vertiginosamente.

Conforme dados fornecidos pelo estudo da Figura 30, a energia eólica é junto com as pequenas centrais hidrelétricas, o tipo de fonte de geração com a melhor relação entre custo unitário e tarifa de energia. Isso acontece por causa do valor do investimento inicial, dado na Figura 29, pois a tarifa de energia é uma forma de compensar o investimento inicial da construção do parque eólico. Como o parque eólico tem uma das melhores relações de custo de implantação pela potência instalada, possui uma das menores tarifas em comparação às demais fontes de

energia elétrica. Para concluir, pondera-se que a PCH possui uma tarifa menor do que a fonte eólica, pois a maior disponibilidade de geração nacional pertence a matriz hídrica (RANGEL; BORGES; DOS SANTOS, 2016).

Figura 30 - Gráfico do Custo Unitário (R\$) x Tarifa de Energia (R\$)



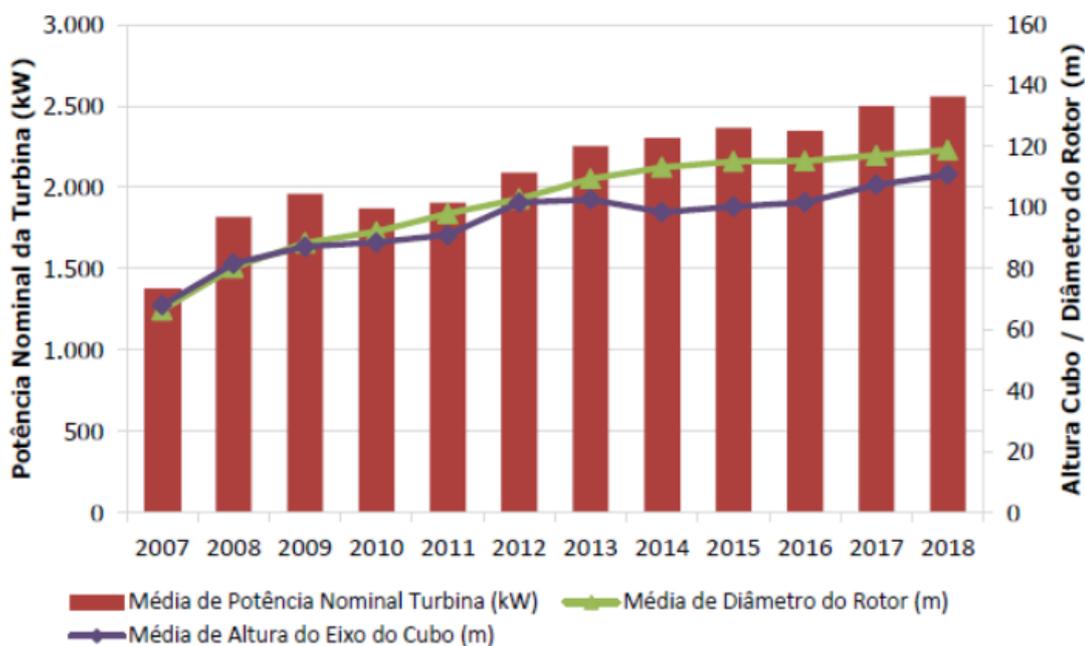
Fonte: RANGEL; BORGES; DOS SANTOS (2016).

5.4 Perspectivas para o custo futuro da fonte eólica *onshore*

Com a evolução tecnológica conquistada pelos aerogeradores, demonstra que a maturidade adquirida dessa fonte de geração traz uma série de benefícios. Dentre as mais significativas, são: o aumento da potência nominal por aerogerador e a regressiva queda no preço de geração.

De acordo com a Figura 31, verifica-se a evolução da potência nominal por turbina do aerogerador no decorrer do tempo, que cresceu cerca de 1000 kW em cerca de 10 anos. Do mesmo modo, sabe-se que a altura dos aerogeradores aumentou por volta de 40m. Por efeito, foi elevado o fator de capacidade das usinas eólicas, este índice leva em consideração a razão entre a produtividade efetiva da usina e sua capacidade máxima (EPE, 2018).

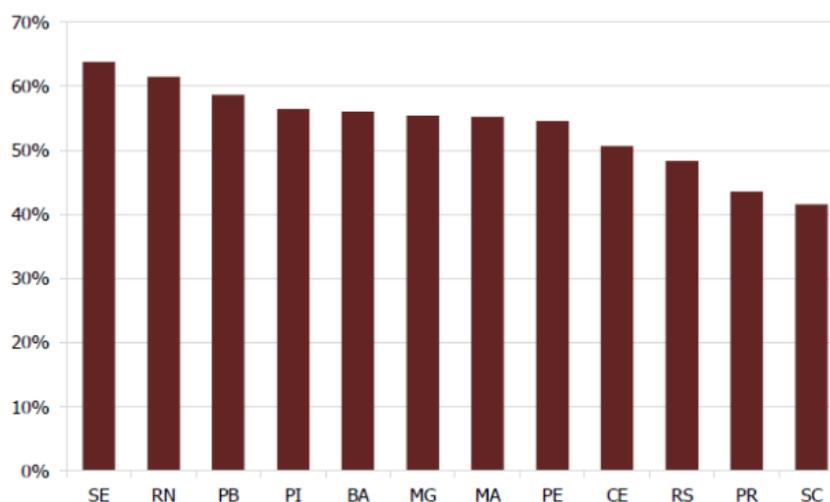
Figura 31 - Médias de potência nominal das turbinas, diâmetro do rotor e altura do cubo



Fonte: EPE (2018).

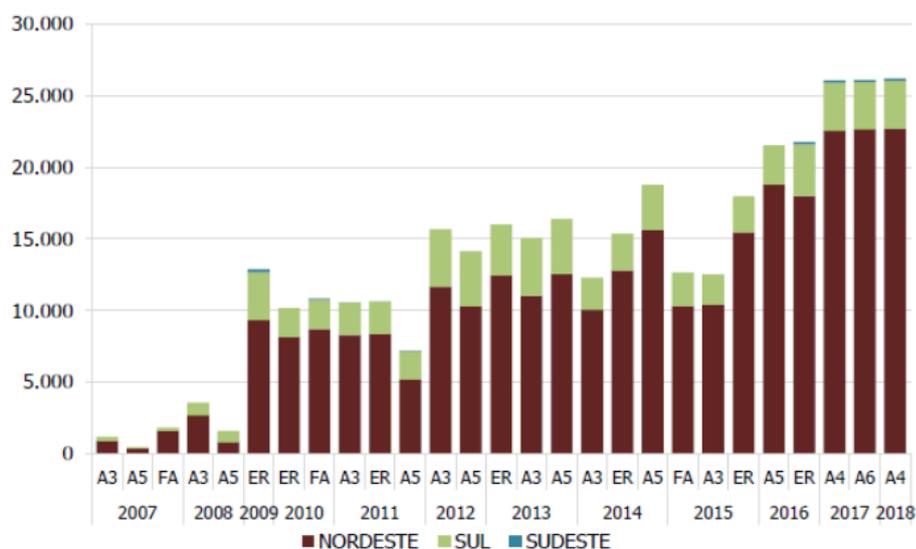
Através da Figura 32, destaca-se a grande participação do nordeste brasileiro na produção de energia eólica no país, adicionalmente, na Figura 33, traz a quantidade de projetos eólicos novos por região brasileira. Além disso, o gráfico mostra o grande fator de capacidade do país, com média de 50%, com destaque ao Sergipe com cerca de 63% de fator de capacidade (P50). O fator P50 trata da produção anual de energia, considerando uma probabilidade de ocorrência igual ou maior a 50%. Levando em consideração que a média mundial para esse fator é de 28%, reforça-se o grande fator de capacidade presente no país (EPE, 2018).

Figura 32 - Média dos fatores de capacidade anual (%), com base no P50, por estado a partir de 2016



Fonte: EPE (2018).

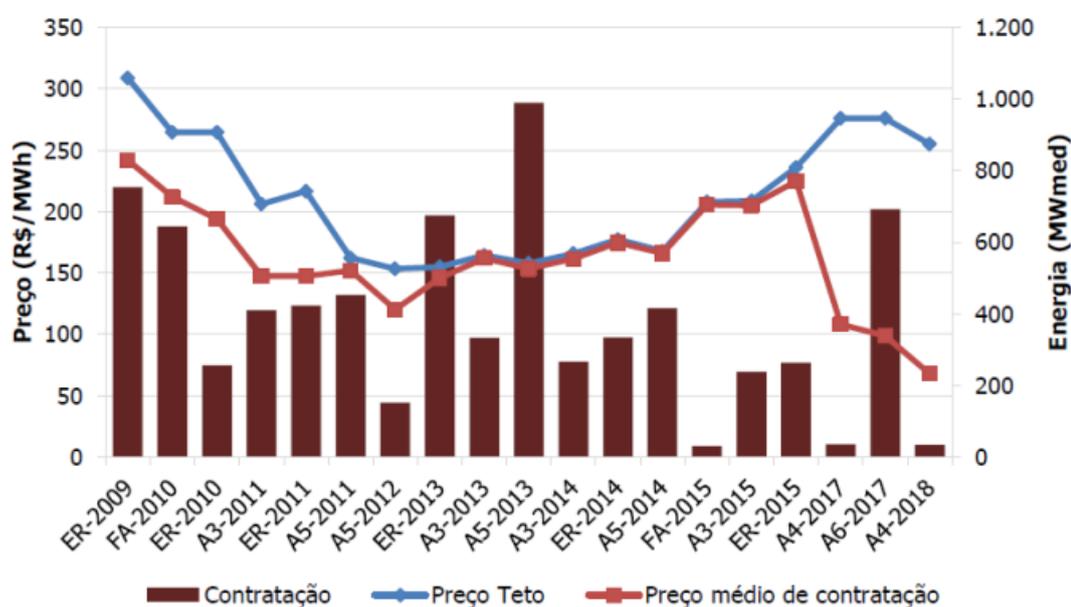
Figura 33 - Empreendimentos eólicos - potência total cadastrada (MW), por região, leilão e ano



Fonte: EPE (2018).

O gráfico apresentado pela Figura 34 traz a variação do preço de contratação dos parques eólicos no Ambiente de Contratação Regulada (ACR) durante os últimos anos. Conforme a medida de preço médio de contratação, nota-se que houve uma redução para cerca de 3 vezes menor do que valor inicial de 250 R\$/MWh. Por meio dos parâmetros e medidas anteriores, a EPE elaborou a Tabela 3, em que traz os valores da energia eólica médios para análises iniciais de custos e previsões.

Figura 34 - Preço de contratação de empreendimentos eólicos nos leilões de energia do ACR e energia



Fonte: EPE (2018).

Tabela 3 - Parâmetros de custo.

	Parâmetros
Custo de Investimento (US\$/kW)	1600 a 1200
Custo O&M Fixo (US\$/kW/ano)	100
Potência Típica (MW)	100
Vida útil (anos)	20
Tempo de construção (anos)	2
FC Médio % (S/SE e N/NE)	40/47

Fonte: EPE (2018).

5.5 Perspectivas para o custo futuro da fonte eólica *offshore*

Em 2017, a Europa apresentava cerca de 16 GW de potência instalada em parques eólicos *offshore*, contrastando com cerca de 1 GW de potência instalada em 2010. Entre 2013 e 2017, a potência instalada europeia evoluiu, com crescimento de 2 GW ao ano. Através desses dados, apura-se o crescimento da fonte eólica *offshore* no mundo, e conseqüentemente, com a ampliação da capacidade instalada, observa-se a concomitante evolução dos processos produtivos e o amadurecimento dessa fonte de energia (EPE, 2018).

No Brasil, o relatório da EPE – Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no horizonte 2050 – relata o andamento de apenas três projetos de produção

de energia eólica *offshore*. A baixa implantação dessa variante de geração no Brasil, deve-se: ao preço elevado da tecnologia, ao custo elevado de implantação, falta de mão de obra qualificada, dependência da importação dos equipamentos e ainda a crescente implantação da modalidade *onshore* (mais viável financeiramente).

O setor *offshore* no Brasil é novo e vem atraindo um grande número de investidores ao redor do mundo. Os tipos de aerogeradores em alto mar são separados em 2 modelos: turbinas fixas e flutuantes. As turbinas fixas são as mais utilizadas ao redor do mundo, pela proximidade das turbinas com o continente e que possuem projetos para serem instaladas no Brasil. Já as turbinas flutuantes ficam em alto mar e não possuem fixação no solo. Como o litoral brasileiro é extenso, possui 8.000 km de costa, e dispõe de potencial de 480 GW para turbina fixa e 748 GW disponíveis para a modalidade de turbina flutuante, o cenário é bastante promissor (FONTELES, 2021).

Assumindo o cenário nascente da energia eólica *offshore* nacional, a Marinha brasileira possui um relatório de medições da velocidade do vento ao longo da costa brasileira, medições realizadas a partir de boias, com altura de medição de 4,5 m, a cerca de 50 km da costa e com profundidade por volta de 200 m. Esse estudo realizado pela Marinha, traz boas perspectivas para a implantação de parques eólicos futuros, em decorrência da boa qualidade do vento nessas regiões (EPE, 2018).

Entretanto, são necessários mais estudos e medições dos ventos no litoral brasileiro para a determinação da viabilidade dos empreendimentos eólicos. Essa afirmação decorre dos seguintes fatos: a turbina eólica será localizada a mais de 100 m em relação ao nível do mar (medição imprecisa), e a profundidade média utilizada na Europa é de 30 m, uma disparidade grande em relação a medição realizada (EPE, 2018).

Conforme se apresenta na Tabela 4, o custo de investimento para a energia eólica *offshore* no Brasil atualmente é em média 3 vezes maior do que o investimento estimado para a modalidade *onshore*. Com isso em vista, o relatório da EPE estima que os valores mundiais de investimento serão próximos de se equiparar apenas em 2040, em um cenário de crescimento acelerado e com incentivos diversos. Embora isso possa se tornar um empecilho, ressalta-se o potencial de instalação eólica *onshore* nacional possa a vir se esgotar, além da grande capacidade de geração que possui o ambiente marítimo.

Tabela 4 - Parâmetros de custo para a fonte eólica *offshore* no Brasil

	Parâmetros
Custo de Investimento (US\$/kW) ¹⁷	5000 a 4200
Custo O&M Fixo (US\$/kW/ano)	210
Potência Típica (MW)	400
Vida útil (anos)	20
FC Médio %	50 a 60

Fonte: EPE (2018).

Em janeiro de 2022, foi divulgado pelo IBAMA que os projetos de energia eólica *offshore* no Brasil saltaram para 36, totalizando uma potência estimada de 80,4 GW. Ademais, a plataforma continental brasileira é considerada rasa, até 20 m profundidade distantes não mais de 20 km da costa nos locais estudados, que aliado ao mar mais calmo em relação ao Mar do Norte (Europa), poderão aumentar a eficiência dos aerogeradores a serem instalados. Conquanto, os parques eólicos despertam o interesse de organizações não governamentais (ONGs) em relação aos impactos ambientais que tendem a causar, como: podem afetar a diversidade marinha, e também, a atividade da pesca (WELLE, 2022).

Na Figura 35, destaca-se um fator relevante da energia eólica *offshore* em relação à *onshore* aqui no Brasil: a presença de geração no Sudeste. Indicado por Machado em 2022, é possível notar que empresas petrolíferas têm interesse em explorar o potencial dos aerogeradores próximos às bacias de petróleo. O Rio de Janeiro se destaca nesse tipo de exploração em plataformas *offshore*. Com a decadência prevista para combustíveis fósseis nos próximos anos, essa nova atividade pode auxiliar na retomada de relevância das empresas desse setor. Por fim, outro destaque é o Rio Grande do Sul, possui 10 parques dos 36 que estão em licenciamento, totalizando 23,6 GW de potência, e também o maior deles, o Ventos do Sul, com 6,5 GW e dispostos a 21 km da costa brasileira (MACHADO, 2022; WELLE, 2022).

Figura 35 - Áreas em licitação para a implementação de energia eólica *offshore* no Brasil

Fonte: IBAMA (2022).

5.6. Comparativo entre custos futuros de geração entre as fontes

A fonte de geração eólica *onshore*, já bem difundida no Brasil já apresenta resultados semelhantes às usinas hidrelétricas, conforme se vê na Tabela 5. Isso representa uma importante alternativa para geração de energia elétrica por aqui, pois há a necessidade de implementação de novas fontes de energia mais próximas aos grandes centros de carga no Brasil, a região Sudeste e Sul. Uma alternativa seria a contínua implementação de usinas fotovoltaicas, segundo a Figura 36, pois o seu custo de manutenção e implementação é bem reduzido, além da utilização de micro e mini gerações em áreas urbanas. Outro fator de destaque, seria o fator de capacidade médio elevado da eólica *offshore*, entre 50 e 60 %, e também, o custo de O&M da geração *offshore*, que é o dobro do custo da *onshore*.

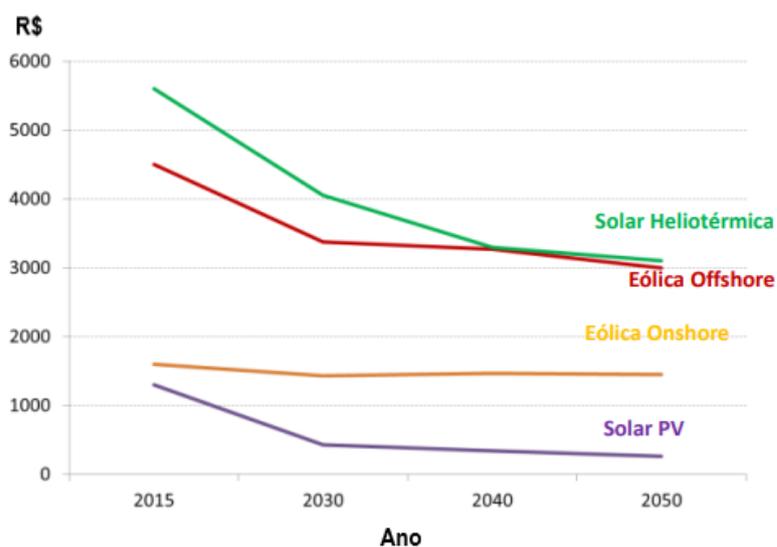
Complementando, o cenário no qual foi criado a Tabela 5 e a Figura 36, representa uma perspectiva para o futuro, tendo como panorama as políticas atuais, observa a tendência da evolução do cenário energético dos próximos anos, além da análise dos parques de geração de energia elétrica em implementação (EPE, 2018).

Tabela 5 - Síntese dos dados de projetos geradores usados nos estudos PNE 2050

Fonte de Geração	CAPEX Referência (US\$/kW)	CAPEX Utilizado (US\$/kW)	FC médio (%)	O&M Anual R\$/kW/ano	CVU (R\$/MWh)
UHE/PCH	1.800 a 4.800	Variável	55	26 / 100	-
Fotovoltaica (FV)	2500 a 950	1350/ 800	30	20/12	-
Heliotérmica (CSP)	3500 a 8000	5600 / 3100	41	70 / 47	-
Eólica onshore	1800 a 2000	1600 / 1200	40 / 47	100	-
Eólica offshore	2500 a 5000	3500/1880	50 / 60	210	-
Bagaço (cana)	600 a 2000	1200	33	120	-
Floresta	1000 a 3000	1500	80	120	150 (floresta)
Gás Natural (CC)	700 a 1200	1000	90	170	260
Gás Natural (CS)	600 a 1000	800	60	270	400
Carvão Nacional	1900 a 2800	2050	69	100	85
Carvão Importado	800 a 3000	2300	69	100	140
Nuclear (adv)	2000 a 6500	5000	90	325	25
UHR	1000 a 2000	1500	-	60 / 100	-
Baterias	1200 a 2000	1500	-	60	-

Fonte: EPE (2018).

Figura 36 - Curva de custos no decorrer dos anos para as fontes renováveis.



Fonte: EPE (2018).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como principais objetivos definir as bases teóricas acerca dos parques eólicos (implantação, funcionamento e processos físicos envolvidos na conversão energética por meio de aerogeradores), matriz energética brasileira e mundial, avaliação da realidade brasileira em relação a energias renováveis (especialmente a eólica) e definição de conceitos importantes para o estudo de viabilidade econômica de parques eólicos.

Para tanto, com base na revisão bibliográfica realizada, foi possível perceber que o setor de energia eólica tem grande potencial de crescimento no Brasil e no mundo, especialmente por conta da demanda global por energias mais sustentáveis e limpas. Neste quesito o Brasil se destaca, pois em 2021 a sua matriz energética é composta em 85,2% de fontes renováveis, quando a média mundial fica em 14%.

Apesar dos investimentos relativamente recentes no mundo, percebe-se que as grandes economias mundiais têm focado nesta fonte de energia, com destaque para a China e para os Estados Unidos. A primeira é responsável pelo maior consumo de energia global e é também a maior geradora de energia eólica. O segundo tem feito grandes investimentos nos últimos anos com planos de aumento de geração para suprir 10 milhões de residências em 2030.

O Brasil tem uma capacidade instalada em 2021 de 19,9 GW de potência, o que supera diversas projeções que acreditavam que chegaria a este valor apenas em 2023. Além disso, possui um enorme potencial de ventos e nos últimos anos tem aumentado seus parques de geração eólica. Os principais encontram-se no nordeste e norte do país. É importante perceber que nestes subsistemas, com a capacidade instalada atual, já é possível abastecer 28,8 milhões de residências ao mês.

Diante disso, notou-se que os maiores custos na construção de um parque estão atrelados às turbinas e equipamentos auxiliares, com cerca de 70% do gasto total do empreendimento. E, apesar do custo na ordem de milhões de reais por MW de capacidade instalada, os parques eólicos mostram-se uma das alternativas renováveis mais rentáveis quanto a investimentos e custos de geração. Os incentivos fiscais e o potencial brasileiro fazem desta matriz uma das mais competitivas, junto às hidrelétricas.

Ainda, pode-se ressaltar alguns fatores que permitiram que a energia eólica ganhasse espaço na conjuntura nacional atual. Dá-se significância à transição

energética mundial para empreendimentos mais renováveis, com o suporte da diversificação da matriz energética, a fim de se criar uma estabilidade de produção em momentos de falta por parte, principalmente, das usinas hidrelétricas. Também foram estabelecidas políticas públicas e incentivos fiscais para o crescimento desse tipo de energia, aliados ao aperfeiçoamento tecnológico e à instalação de indústrias e montadoras em solo nacional, o Brasil pôde desfrutar de um crescimento na capacidade eólica acumulada de 15% ao ano, desde 2000.

Como resultado das ações anteriormente citadas, o Brasil ocupa a sétima posição em capacidade total instalada de energia eólica *onshore* no mundo. Com 21 GW instalados em janeiro de 2022, espera-se que o país chegue à marca de 28 GW já em 2026. Um salto nunca antes imaginado ser possível para matrizes limpas e renováveis,

Assim, como aponta Gannoum (2021), o desafio do Brasil não se trata de encontrar as suas fontes renováveis, pois como bem se sabe no país há qualidade enorme de ventos, potencial solar gigantesco, crescimento da biomassa e potencial utilização do gás natural oriundo do pré-sal. Portanto, a transição energética encontra-se encaminhada. O momento é de investimento em fontes abundantes renováveis, resguardando os recursos naturais e trazer retorno social e econômico para a sociedade.

Por fim, com o objetivo de estender os conceitos abordados neste trabalho, são listadas a seguir algumas propostas para trabalhos futuros:

1. Analisar os maiores desafios para a implementação de parques eólicos *offshore*;
2. Descrever o processo de instalação de um parque eólico *offshore*, levando em consideração aspectos como profundidade, distância à costa, transmissão e montagem.
3. Examinar o *payback* esperado de um parque eólico; e
4. Investigar a capacidade total de geração eólica, julgando sua participação na matriz elétrica futura.

REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA. **Boletim anual ABEEólica - Dados 2020**. ABEEólica, 2021. Disponível em: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2021/06/PT_Boletim-Anual-de-Gera%C3%A7%C3%A3o_2020.pdf. Acesso em: 20 nov. 2021.
- AGENCE FRANCE PRESSE. **EUA construirá sete parques eólicos nas costas - ISTOÉ DINHEIRO**, 14 out. 2021. Disponível em: <https://www.istoedinheiro.com.br/eua-construira-sete-parques-eolicos-nas-costas/>. Acesso em: 8 dez. 2021
- ANEEL. **Matriz energética cresce 383,66 MW em março e 682,61 MW no primeiro trimestre de 2021**. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/id/21866628. Acesso em: 5 dez. 2021.
- AWASTHI, S. R. **Wind Power: Practical Aspects**. Índia: Editora Teri, 2018.
- BENTO, D. **Energia dos ventos - O Setor Elétrico**. 15 dez. 2017. Disponível em: <https://osetoreletrico.com.br/energia-dos-ventos/>. Acesso em: 28 nov. 2021
- BLEWETT, D. **Wind Turbine Cost: How Much? Are They Worth It In 2022?** Weather Guard Lightning Tech. Dez. 2021. Disponível em: <https://weatherguardwind.com/how-much-does-wind-turbine-cost-worth-it/>. Acesso em: 17 abr. 2022.
- BRASIL ENERGIA. **Cenários Eólica**. Disponível em: <https://cenarioseolica.editorabrasilenergia.com.br/panorama/sustentabilidade/>. Acesso em: 22 nov. 2021.
- CAMPOS, F. R. N. **Diversificação da matriz energética baseada em recursos renováveis: impactos sobre segurança elétrica brasileira**. Tese de Mestrado—São Mateus: Universidade Federal do Espírito Santo, 2018.
- CARVALHO, B. **Especialistas pedem mais investimento em energia eólica no país**. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/especialistas-pedem-mais-investimento-em-energia-eolica-no-pais/>. Acesso em: 24 nov. 2021.
- CHAGAS, C. C. M. et al. **From Megawatts to Kilowatts: A Review of Small Wind Turbine Applications, Lessons From The US to Brazil**, Sustainability.v. 12, n. 7, p. 2760, jan. 2020.
- CHANG, N.; OBERST, C.; MADLENER, R. **Economic Policy Evaluation for the Deployment of Alternative Energy Sources in Brazil**. Rochester, NY: Social

Science Research Network, 1 out. 2015. Disponível em: <https://papers.ssrn.com/abstract=2721630>. Acesso em: 15 nov. 2021.

CRUZ, J. **Inaugurada nova fábrica de turbinas de energia eólica em Aquiraz**. Governo do Estado do Ceará. Nov. 2019. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2019/11/12/inaugurada-nova-fabrica-de-turbinas-de-energia-eolica-em-aquiraz/>. Acesso em: 16 abr. 2022.

CUNHA, E. A. A. et al. **Aspectos históricos da energia eólica no Brasil e no mundo**, Revista Brasileira de Energias Renováveis v. 8, n. 4, p. 9, 1 abr. 2019.

DA PURIFICAÇÃO, L. S.; DELLA FONTE, R. B. **Estudo de turbinas eólicas verticais com exemplo de dimensionamento de uma turbina eólica Darrieus para aplicação em edifícios**. Vitória: UFES, 2012.

DE AGUIAR, B. F. et al. Caderno de Preços da Geração 2021. **Caderno de Preços da Geração 2021**, p. 72, 18 ago. 2021.

ELIA, A.; TAYLOR, M.; GALLACHÓIR, B. Ó.; ROGAN, F. **Wind turbine cost reduction: A detailed bottom-up analysis of innovation drivers**. ELSEVIER, Energy Policy, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421520306236/pdf?md5=982a30b2448d061e8e5692d83d80f491&pid=1-s2.0-S0301421520306236-main.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2022.

ELOI, G. **Etapas da construção de um parque eólico - Eletrocuriosidades**, 31 out. 2012. Disponível em: <https://eletrocuriosidades.blogspot.com/2012/10/etapas-da-construcao-de-um-parque-eolico.html>. Acesso em: 28 nov. 2021

EPE. **Matriz energética e elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 5 dez. 2021.

EPE. **Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica**, nov. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-456/NT%20PR%20007-2018%20Premissas%20e%20Custos%20Oferta%20de%20Energia%20El%C3%A9trica.pdf>. Acesso em: 6 abr. 2022

EPE. **Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica**, nov. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoesdadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao->

227/topico456/NT%20PR%200072018%20Premissas%20e%20Custos%20Oferta%20de%20Energia%20EI%C3%A9trica.pdf. Acesso em: 6 abr. 2022

EPE; MME. **Balço Energético Nacional 2020**. Brasil: EPE; MME, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2021.

EPE; MME. **Instruções para solicitação de cadastramento e habilitação técnica com vistas à participação nos leilões de energia elétrica**. Brasil: EPE; MME, 2017. Acesso em: 28 nov. 2021.

EPE; MME. **Leilões de Energia: Instruções para as medições anemométricas e climatológicas em parques eólicos**. Brasil: EPE; MME, maio 2014. Acesso em: 28 nov. 2021.

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia Eólica**. 1ª ed. Barueri-SP-Brasil: Editora Manole Ltda., 2011.

FONTELES, J. **Eólicas offshore no Brasil são uma boa nova, escreve Julia Fonteles**. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/opiniaoeolicas-offshore-no-brasil-sao-uma-bo-nova-escreve-julia-fonteles/>. Acesso em: 22 maio. 2022.

FRATA. **Casa dos Ventos e Vestas fecham o maior contrato para aquisição de 120 turbinas para projeto no Nordeste**. Dez. 2020. Disponível em: <https://frata.com.br/casa-dos-ventos-e-vestas-fecham-o-maior-contrato-para-aquisicao-120-turbinas-para-projeto-no-nordeste/>. Acesso em 16 abr. 2022.

FURSTENWERTH, D.; PESCIA, D.; LITZ, P. **Os custos de integração de energia eólica e solar**. Agora Energiewende. Mara Marthe Kleiner. Dez. 2015.

GADONNEIX, P. et al. **World Energy Scenarios - Composing energy futures to 2050**. World Energy Council 2013, p. 44, 2013.

GANNOUM, E. **Dia Mundial do Vento - O Setor Elétrico**, 18 jul. 2019. Disponível em: <https://osetoreletrico.com.br/dia-mundial-do-vento/>. Acesso em: 24 nov. 2021

GANNOUM, E. **Energias renováveis e uma oportunidade para a transformação da sociedade brasileira - Cenários Energia - Eólica**, 29 jan. 2021. Disponível em: <https://cenarioseolica.editorabrasilenergia.com.br/2021/01/29/energias-renovaveis-e-uma-oportunidade-para-a-transformacao-da-sociedade-brasileira/>. Acesso em: 23 nov. 2021

- GARBE, E. A.; MELLO, R. DE; TOMASELLI, I. **Projeto conceitual e análise de viabilidade econômica de unidade de geração de energia elétrica eólica na Lagoa dos Patos - RS**. v. XV, n. 83, dez. 2011.
- GNOATTO, H. **Análise de viabilidade técnica e econômica para implantação de aerogerador em propriedades rurais de Cascavel, Londrina e Palmas-PR**. Tese de Mestrado—Cascavel: Universidade do Oeste do Paraná, 2017.
- GORINI, R. Custos de Geração de Energia Renovável. **Custos de Geração de Energia Renovável**, p. 35, ago. 2018.
- HAU, E. **Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2013.
- HENRIQUES, T. R. DA S. **Análise da qualidade de energia de um parque eólico com ligação à rede elétrica**. 2016. Disponível em: <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/24115>. Acesso em 06 de dez. 2021.
- IBAMA. **Mapas de projetos em licenciamento - Complexos Eólicos Offshore**. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/laf/consultas/mapas-de-projetos-em-licenciamento-complexos-eolicos-offshore>. Acesso em: 8 maio. 2022.
- IBERDROLA. **Chafariz reafirma nosso compromisso com a energia eólica onshore na América Latina**. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/quem-somos/linhas-negocio/projetos-emblematicos/complexo-eolico-terrestre-chafariz>. Acesso em: 22 maio. 2022.
- IBERDROLA. **Funcionamento dos parques eólicos onshore**. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/como-funcionam-parques-eolicos-onshore>. Acesso em: 18 abr. 2022b.
- IBERDROLA. **O que é a energia eólica offshore**. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/como-funcionam-os-parques-eolicos-offshore>. Acesso em: 18 abr. 2022a.
- IEA. **Renewables 2021: Analysis and forecast to 2026**. [s.l.] OECD, dez. 2021. Disponível em: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/renewables-2020_c74616c1-en. Acesso em: 5 dez. 2021.
- INVESTING. **USD/BRL – Dólar Americano Real Brasileiro**. 2022, Disponível em: <https://br.investing.com/currencies/usd-brl>. Acesso em: 17 abr. 2022.
- LEE, J.; ZHAO, F. **Global Wind Report**. Bélgica: [s.n.]. Disponível em: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf>. Acesso em: 8 dez. 2021.

- MACHADO, N. **Eólicas offshore em licenciamento no Brasil somam 80 GW** Agência epbr, 28 jan. 2022. Disponível em: <https://epbr.com.br/eolicas-offshore-em-licenciamento-no-brasil-somam-80-gw-de-potencia/>. Acesso em: 8 maio. 2022
- MESQUITA, J. L. **Energia eólica no Brasil, o futuro está no mar - Mar Sem Fim**, 21 ago. 2021b. Disponível em: <http://marsemfim.com.br/energia-eolica-no-brasil-o-futuro-esta-no-mar/>. Acesso em: 23 nov. 2021
- MESQUITA, J. L. **Usinas eólicas no mar, Brasil terá marco legal - Mar Sem Fim**, 25 fev. 2021a. Disponível em: <http://marsemfim.com.br/usinas-eolicas-no-mar-brasil-tera-marco-legal/>. Acesso em: 23 nov. 2021
- NASSA, T. et al. **Crise de Energia: Como se Prevenir? - Portal Solar - Tudo sobre Energia Solar Fotovoltaica**, 26 ago. 2015. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-renovavel/crise-de-energia--como-se-prevenir-.html>. Acesso em: 7 dez. 2021
- O'MEARA, S. **China's plan to cut coal and boost green growth**. Nature; v. 584, n. 7822, p. S1–S3, 27 ago. 2020.
- ONS. **O sistema em números**. Disponível em: <http://ons.org.br:80/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 7 dez. 2021.
- PINTO, M. **Energia eólica - princípios e operação**. 1ª ed. São Paulo: Editora Érica, 2019.
- PINTO, M. **Fundamentos da Energia Eólica**. 1ª Edição ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2012.
- PORTAL SOLAR. **Energia eólica: o que é e como funciona**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-x-energia-eolica-precos.html>. Acesso em: 8 dez. 2021.
- PORTILLO, G. **O que é e quão importante é a orografia**. Meteorología en Red, 23 jul. 2019. Disponível em: <https://www.meteorologiaenred.com/pt/orografia.html>. Acesso em: 5 dez. 2021
- RANGEL, M. S.; BORGES, P. B.; DOS SANTOS, I. F. S. Análise comparativa de custos e tarifas de energias renováveis no Brasil. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, n. 3, 19 ago. 2016.
- REIS, T. **CAPEX: entenda como analisar o investimento em bens de capital**. Disponível em: <https://www.suno.com.br/artigos/capex/>. Acesso em: 7 maio. 2022.
- REIS, T. **Depreciação: como calcular e analisar esse conceito contábil**. SUNO, 2018. Disponível em:

<https://www.sun0.com.br/artigos/depreciacao/#:~:text=Na%20pr%C3%A1tica%2C%20os%20bens%20se,ao%20valor%20atualizado%20do%20bem>. Acesso em: 17 abr. 2022.

REN21. **Renewables 2021 - Global Status Report**. [s.l: s.n.]. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf.

Acesso em: 7 dez. 2021.

SAMPAIO, K. R. A.; BATISTA, V. **O atual cenário da produção de energia eólica no Brasil: Uma revisão de literatura**. Research, Society and Development, v. 10, n. 1, p. e57710112107, 31 jan. 2021.

SECIUK, C. **“Itaipus” em alto-mar: como o vento no oceano pode ampliar a geração de energia no país**. Jornal. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/economia/energia-eolica-offshore-pode-ampliar-geracao-de-energia-no-brasil/>. Acesso em: 18 abr. 2022.

SILVA, B. S. C. **A Engenharia Civil e a Produção Industrial de Energia Eólica**. Tese de Mestrado – Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, dez. 2013.

SIMÕES MOREIRA, J. R. **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. 2ª Edição ed. [s.l.] Editora LTC, 2021.

VIAN, A. et al. **Energia Eólica - fundamentos, tecnologia e aplicações**. 1ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2021.

WELLE, D. **Energia eólica offshore tem potencial promissor no Brasil – com ressalvas ISTO É DINHEIRO**, 20 fev. 2022. Disponível em: <https://www.istoedinheiro.com.br/energia-eolica-offshore-tem-potencial-promissor-no-brasil-com-ressalvas/>. Acesso em: 8 maio. 2022

WINDBOX. **Componentes dos aerogeradores: conheça toda sua estrutura**. Jan. 2020. Disponível em: <http://windbox.com.br/blog/componentes-dos-aerogeradores/>. Acesso em: 16 abr. 2022.

WORLD ENERGY COUNCIL. **Trilemma Index**. Londres: Worls Energy Council, 2021. Disponível em: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WE_Trilemma_Index_2021.pdf?v=1634811254. Acesso em: 6 dez. 2021.

**ANEXO A – MODELO DE DECLARAÇÃO PARA FINS DE CADASTRAMENTO E
HABILITAÇÃO TÉCNICA DE EMPREENDIMENTOS EÓLICOS.**

<i>(Papel timbrado do empreendedor)</i>	<i>(local e data)</i>
<p>À EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE Avenida Rio Branco nº 1, 11º Andar CEP: 20090-003 - Rio de Janeiro - RJ Diretoria de Estudos de Energia Elétrica At : Diretor de Estudos de Energia Elétrica</p>	
<p>Assunto: Leilão : XX/20.... - Cadastramento para fins de Habilitação Técnica</p>	
<p>Referência: EOL (nome do empreendimento)</p>	
<p>A (nome da razão social do empreendedor), com CNPJ nº (informar o nº), localizada na (informar o endereço, município, CEP e UF) vem, por meio de seu representante legal, (nome completo do representante legal), requerer de V.Sª. o Cadastramento e a Habilitação Técnica do empreendimento eólico (informar o nome da EOL), com a finalidade de participar do leilão de compra de energia a ser realizado em conformidade com a Portaria MME nº (informar o nº e data).</p>	
<p>Em atendimento às INSTRUÇÕES PARA SOLICITAÇÃO DE CADASTRAMENTO E HABILITAÇÃO TÉCNICA COM VISTAS À PARTICIPAÇÃO NOS LEILÕES DE ENERGIA ELÉTRICA PARA EMPREENDIMENTOS EÓLICOS, anexamos à presente solicitação mídia contendo uma via digitalizada dos documentos abaixo relacionados:</p>	
<p>Anexo 1 – Registro da ANEEL (ou Protocolo); Anexo 2 – Memorial Descritivo do Projeto; Anexo 3 – Licença Ambiental (ou Protocolo); Anexo 4 – Parecer de Acesso (ou protocolo); Anexo 5 – Ficha de Dados; Anexo 6 – Certificado de Medições Anemométricas e de Produção Anual de Energia; Anexo 7 – Direito de Usar ou Dispor do Local da EOL e seus anexos; Anexo 8 – Declaração para fins de Cadastramento e Habilitação Técnica de Empreendimentos Eólicos; Anexo 9 – Estudos Ambientais.</p>	
<p>Conforme o item 5.13 das referidas Instruções, a mídia digital apresenta a pasta nº 1, com a gravação dos anexos de 1 a 8, e a pasta nº 2, contendo a gravação do Anexo 9 - Estudos Ambientais.</p>	
<p>Informamos que o Interlocutor junto à EPE, responsável pelo envio e recebimento de informações e/ou correspondências, bem como para quaisquer esclarecimentos que se fizerem necessários, será o Senhor(a) (informar a mesma pessoa declarada no Sistema AEGE), cujos telefones, fax e e-mail são aqueles declarados no Sistema AEGE. O endereço para envio de correspondência é o mesmo endereço constante da guia "Outorgas" do Sistema AEGE.</p>	
<p>Declaro, sob as penas da lei, que todos os arquivos apresentados em meio digital, conforme a lista de anexos acima, são idênticos aos originais que estão de posse do empreendedor, o mesmo se aplicando a eventuais documentos complementares a ser apresentados ao longo do processo, e que os mesmos fazem referência ao projeto em epígrafe. Caso se sagre vencedor no presente certame, caberá ao empreendedor apresentar à EPE os documentos originais, no prazo de 10 (dez) dias, contados a partir da data de realização do leilão.</p>	
<p>Atenciosamente,</p> <hr style="width: 20%; margin: auto;"/> <p>(cargo)</p>	
<p>Assinatura do Representante Legal (com reconhecimento de firma)</p>	

Fonte: EPE; Ministério de Minas e Energia. Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica com vistas à Participação nos Leilões de Energia Elétrica. Anexo I. Brasil: EPE; MME, 2017.

ANEXO B – DOCUMENTOS DO PROCESSO DE HABILITAÇÃO

Pasta	Sub Pastas e/ou Arquivos no CD, DVD ou pen drive	Documentos	Observações
Pasta 1	Anexo 0_Requerimento	Requerimento de Cadastramento	Conforme modelo do ANEXO I (em duas vias)
	Anexo 1_Registro ANEEL	Protocolo de Registro da ANEEL	Entrega obrigatória no ato do cadastramento na EPE
		Registro na ANEEL	Deverá ser apresentado conforme estabelecido em Portaria do MME.
	Anexo 2_Memorial	Memorial Descritivo do Projeto	Entrega obrigatória no ato do cadastramento na EPE.
	Anexo 3_Licenca	Protocolo da Licença	Entrega obrigatória no ato do cadastramento na EPE.
		Licença Ambiental	Deverá ser apresentada conforme estabelecido em Portaria do MME.
	Anexo 4_Parecer Acesso	Parecer de Acesso ONS (Rede básica ou DIT) *	Deverá ser apresentado conforme estabelecido em Portaria do MME.
		Parecer de Acesso da Distribuidora ou Documento de Acesso Para Leilão - DAL	
		Protocolo da solicitação do Parecer de Acesso, Informação de Acesso ou Documento de Acesso para Leilão - DAL	Entrega obrigatória no ato do cadastramento na EPE.
Anexo 5_Ficha Dados	Ficha de Dados	Entrega obrigatória no ato do cadastramento na EPE.	
Anexo 6_Certificado	Certificado de Consistência das Medições Anemométricas e de Produção de Energia e os Arquivos das Medições	Entrega obrigatória no ato do cadastramento na EPE.	
Anexo 7_Direito Uso	Direito de Usar ou Dispor do Local da EOL	Entrega obrigatória no ato do cadastramento na EPE.	
Anexo 8_Declaracao	Declaração para fins de Cadastramento e Habilitação Técnica de Empreendimentos Eólicos	Entrega obrigatória no ato do cadastramento na EPE.	
Pasta 2	Anexo9_Estudos Ambientais	Estudos e Relatórios de Impacto Ambiental	Entrega obrigatória no ato do cadastramento na EPE.

Fonte: EPE; Ministério de Minas e Energia. Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica com vistas à Participação nos Leilões de Energia Elétrica. Anexo VI.

Brasil: EPE; MME, 2017.

ANEXO C – PLANILHA DE CUSTOS CIVIS DE UM PARQUE EÓLICO.

Item	DESIGNAÇÃO	Unidades	QUANT.	PREÇOS (€)		TOTAL
				Unitário (€)	Parcial	
1	Estradas					75.470,66 €
1.1	Beneficiação de acessos existentes	km	0,46	17.307,24 €	7.961,33 €	
1.2	Execução de novos acessos, incluindo escavação, aterro, pavimentação e sinalização	km	1,98	28.046,70 €	55.532,47 €	
1.3	Valetas não revestidas e encaminhamiento para valas revestidas com pedra solta	m	6,00	12,21 €	73,26 €	
1.4	Valetas revestidas a betão	m	1.580,00	1,86 €	2.938,80 €	
1.5	Passagens hidráulicas Ø 0,60 m	ml	40,00	224,12 €	8.964,80 €	
2	Plataformas e drenagem perimetral das fundações					48.856,31 €
2.1	Plataformas para aerogeradores	Un	5,00	7.678,62 €	38.393,10 €	
2.2	Plataformas para torre meteorológica permanente	Un	1,00	4.182,56 €	4.182,56 €	
2.3	Drenagem perimetral das fundações dos aerogeradores e encaminhamiento das águas por gravidade para o exterior das plataformas	Un	5,00	1.256,13 €	6.280,65 €	
3	Maciço para torre meteorológica permanente					17.240,69 €
3.1	Escavação	m³	115,00	9,31 €	1.070,65 €	
3.2	Drenagem	m³	56,40	21,65 €	1.221,06 €	
3.3	Cofragem	m²	46,00	17,83 €	820,18 €	
3.4	Amaduras	kg	5.900,00	1,38 €	8.142,00 €	
3.5	Betão	m³	72,00	83,15 €	5.986,80 €	
4	Maciço aerogerador					105.314,30 €
4.1	Escavação	m³	800	9,31 €	7.448 €	
4.2	Drenagem	m³	392	21,65 €	8.486,8 €	
4.3	Cofragem	m²	190	14,27 €	2.711,3 €	
4.4	Amaduras	kg	33.090	1,38 €	45.664,2 €	
4.5	Betão (C35/45)	m³	400	102,51 €	41.004 €	
5	Edifício de comando e subestação					
5.1	Edifício de comando					161.381,85 €
5.1.1	Escavações, fundações e estruturas de betão		1,00	124.612,24 €	124.612,24 €	
5.1.2	Alvenaria de blocos e/ou tijolo		1,00	5.168,96 €	5.168,96 €	
5.1.3	Acabamentos de trolha, pintor, ...		1,00	2.090,17 €	2.090,17 €	
5.1.4	Carpintarias e serralharias		1,00	7.114,66 €	7.114,66 €	
5.1.5	Diversos (restantes trabalhos)		1,00	22.395,82 €	22.395,82 €	
5.2	Subestação					128.441,29 €
5.2.1	Fundações e estruturas de betão armado de suporte dos equipamentos		1,00	10.965,52 €	10.965,52 €	
5.2.2	Vedação: murete, rede e portões		1,00	25.320,21 €	25.320,21 €	
5.2.3	Fossas do transformador e de recolha de óleos		1,00	13.358,72 €	13.358,72 €	
5.2.4	Caleiras de cabos		1,00	8.737,80 €	8.737,80 €	
5.2.5	Acabamentos		1,00	8.737,80 €	8.737,80 €	
5.2.6	Outros trabalhos		1,00	61.321,24 €	61.321,24 €	
6	Valas para cabos MT					38.858,95 €
6.1	Para 1 sistema trifásico	m	1.395,00	11,15 €	15.554,25 €	
6.2	Para 2 sistemas trifásicos	m	1.825,00	11,15 €	20.348,75 €	
6.4	Identificadores de localização das valas	Un	55,00	14,66 €	806,30 €	
6.5	Atravessamentos de acessos e de plataformas	Un	5,00	429,93 €	2.149,65 €	
7	Recuperação paisagística			9.898,37 €		9.898,37 €
8	Fornecimento de equipamentos pelas Obras					9.679,97 €
8.1	Placa identificativa do Parque	Un	1,00	2.564,94 €	2.564,94 €	
8.2	Estantes e mesa de carpinteiro (ferramentaria)		1,00	1.987,22 €	1.987,22 €	
8.3	Mobiliário para a sala de comando		1,00	1.975,00 €	1.975,00 €	
8.4	Quadro de parede tipo "PICTOGRAMA"	Un	1,00	301,69 €	301,69 €	
8.5	Grupo hidropneumático	Un	1,00	1.690,77 €	1.690,77 €	
8.6	Bloco de identificação do aerogerador	Un	5,00	232,07 €	1.160,35 €	
9	Manutenção das obras no período de garantia			9.771,20 €		9.771,20 €
10	TOTAL GLOBAL					604.913,29 €

Fonte: SILVA, B. S. C. A Engenharia Civil e a Produção Industrial de Energia Eólica. Tese de Mestrado – Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, dez. 2013. Tabela 15, p. 96.