



**CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIFAAT**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**BRUNO FERNANDES**

**FRANCISCO BERNARDO DE CARVALHO**

**JOÃO GABRIEL MEGDA MORAIS**

**LEONARDO THOMAZ PIQUES**

**MATHEUS FERNANDES AUGUSTINHO**

**PRÍNCÍPIOS DA GERAÇÃO EOLIOELÉTRICA E DEMONSTRAÇÃO EM**  
**ESCALA REDUZIDA**

**Atibaia**

**2022**

**2022**

**BRUNO FERNANDES**

**FRANCISCO BERNARDO DE CARVALHO**

**JOÃO GABRIEL MEGDA MORAIS**

**LEONARDO THOMAZ PIQUES**

**MATHEUS FERNANDO GONÇALVES AUGUSTINHO**

**PRINCÍPIOS DA GERAÇÃO EOLIOELÉTRICA E DEMONSTRAÇÃO EM  
ESCALA REDUZIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Centro Universitário  
UNIFAAT, como requisito parcial  
para obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Elétrica, sob  
orientação do Prof. Dr. Kleber  
Hashimoto

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Alcino Biazon

Prof. Dr. Hércules Brasil Vernalha

Prof. Dr. Vitor Santana Ramos

**Atibaia, 16 de Dezembro de 2022**

P952

Princípios da geração eólioelétrica e demonstração em escala reduzida. /  
Morais, João Gabriel Megda... [et.al.] -- 2022.  
114 f.; 30 cm.

Orientação: Kleber Hashimoto

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Centro Universitário  
UNIFAAT, como requisito para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Elétrica do Centro Universitário UNIFAAT, Atibaia, 2022.

1. Energia eólica 2. Energia eólioelétrica 3. Sistema eólico 4. Engenharia  
Elétrica I. Moraes, João Gabriel Megda II. Augustinho, Matheus Fernando  
Gonçalves III. Carvalho, Francisco Bernardo de IV. Fernandes, Bruno V.  
Moreira, Leonardo Thomaz Piques VI. Hashimoto, Kleber  
VII. Título

CDD 621.45

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaríamos de agradecer a Deus, por nos dar força e coragem para trilhar nossos sonhos, e ao nosso orientador Kleber Hashimoto, por aceitar conduzir este trabalho de pesquisa.

A todos os nossos professores do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário UNIFAAT, pela excelência da qualidade técnica de cada um, e em especial, ao professor Flávio Godoy Correa, que nos acompanha desde o início sempre nos incentivando com toda sua didática e profissionalismo.

Aos nossos pais que sempre estiveram ao nosso lado apoiando ao longo de toda a trajetória, em especial a mãe do Leonardo, Maria Regina Thomaz Moreira, por todo empenho e suporte para construção da maquete do nosso projeto. Aos nossos irmãos pela amizade e atenção dedicadas quando sempre precisamos.

Agradecemos as nossas esposas e namoradas que sempre estiveram ao nosso lado durante todo o percurso acadêmico. Em especial a namorada do Matheus, Maria Eduarda, por todo seu esforço, empenho e suporte na montagem da apresentação. Por último, queremos agradecer também à Universidade e todo o seu corpo docente.

*Não importa quanto a vida possa ser ruim, sempre existe algo que você pode fazer, e triunfar.  
Enquanto há vida, há esperança.”*

*(Stephen Hawking)*

## RESUMO

A matriz energética mundial tem demonstrado uma contínua e preocupante dependência dos combustíveis fósseis, que pressionam os mecanismos do equilíbrio climático. Aliado aos efeitos danosos ao meio ambiente, também é necessário endereçar soluções tecnológicas sustentáveis. Neste contexto, os esforços para uma mudança estrutural são caracterizados como iniciativas para uma transição energética. A utilização das energias renováveis, tais como a geração eólica, é uma iniciativa que contribui para a promoção de uma agenda ambiental positiva.

Dentre as tecnologias consideradas limpas, a energia eólica tem recebido recente destaque. A adoção de políticas de incentivo, em geral na forma de subsídios, além da evolução tecnológica aliado ao efeito do ganho de escala, vem promovendo substanciais acréscimos da geração eólioelétrica em vários países. Este trabalho apresenta os principais aspectos históricos desse mercado, a tendência de inserção na matriz energética e as principais características tecnológicas.

Para demonstração do seu funcionamento, foi projetado e construído um protótipo em escala reduzida demonstrando que as velocidades de vento aplicadas no sistema, mesmo que em melhores aproveitamentos eólicos, recupera-se um máximo de 59,3% da energia do vento, provando a teoria da potência de Betz transformando energia cinética do vento em energia mecânica de rotação com tensão pico-pico de 30 V. Ainda que em escala demonstrativa, o projeto constitui uma prova de conceito que evidenciou os principais conceitos tecnológicos da geração eólica.

**Palavras-Chave:** Energia eólica, energia eólioelétrica, sistema eólico, combustíveis fósseis, tecnologias.

## ABSTRACT

The global energy matrix has demonstrated a continuous and worrying dependence on fossil fuels, which put pressure on the mechanisms of climate balance. Combined with the harmful effects on the environment, it is also necessary to address sustainable technological solutions. In this context, efforts for structural change are characterized as initiatives for an energy transition. The use of renewable energies, such as wind generation, is an initiative that contributes to the promotion of a positive environmental agenda. Among the technologies considered clean, wind energy has received recent prominence. The adoption of incentive policies, usually in the form of subsidies, in addition to technological evolution combined with the effect of scale gain, has been promoting substantial increases in eolicoelectric generation in several countries. This paper presents the main historical aspects of this market, the trend of insertion in the energy matrix and the main technological characteristics. To demonstrate its operation, a small-scale prototype was designed and constructed demonstrating that the wind speeds applied to the system, even in better wind farms, recover a maximum of 59.3% of the wind energy, proving Betz's theory of power by transforming kinetic wind energy into mechanical rotating energy with peak-peak voltage of 30 V. Although on a demonstrative scale, the project is a proof of concept that evidenced the main technological concepts of wind generation.

**Keywords:** Wind energy, wind electric energy, wind system, fossil fuels, technologies.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Emissões de dióxido de carbono no Brasil em 2020 e 2021 (tCO <sub>2</sub> e) .....	15
Figura 2 - Emissões de gases de efeito estufa no setor de Energia (1970 – 2021) .....	15
Figura 3 - Emissões de gases de efeito estufa nas atividades do setor de energia (1970 – 2021) .....	16
Figura 4 - Emissões de metano no Brasil 2020 .....	17
Figura 5 - Emissões fugitivas de metano no Brasil 2020 .....	18
Figura 6 - Comparação internacional da participação de fontes renováveis na Oferta Interna de Energia - OIE .....	19
Figura 7 - Evolução da participação das fontes renováveis na Oferta Interna de Energia – OIE .....	20
Figura 8 - Participação da energia renovável na matriz elétrica brasileira comparada ao mundo e a OCDE .....	21
Figura 9 - Moinho de vento persa na cidade de Neh. A pedra do moinho está abaixo do rotor e as velas estão fixadas nas palhetas (a), vista frontal dos moinhos persas (b) .....	22
Figura 10 - Moinho holandês .....	22
Figura 11 - Moinho americano de Daniel Halladay .....	23
Figura 12 - Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no período do Século XI ao Século XIX .....	23
Figura 13- Primeira turbina eólica de James Blyth em Marykirk, 1891 .....	24
Figura 14 - Turbina eólica de Charles Francis Brush, em Ohio, 1888 .....	24
Figura 15 - Aerogerador Balaclava, 1931 .....	26
Figura 16 - Turbina eólica Mod-5B instalada na Ilha de Oahu – Hawaii em 1987 no projeto de cooperação DOE/NASA .....	27
Figura 17 - Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no século XX ...	28
Figura 18 - Geração de energia eólica mundial no cenário Net Zero 2010-2021 .....	29
Figura 19 - Evolução dos aerogeradores onshore nas últimas duas décadas .....	31
Figura 20 - Funcionamento parque eólico onshore .....	32
Figura 21 - Evolução dos aerogeradores offshore nas últimas duas décadas .....	33
Figura 22 - Funcionamento parque eólico offshore .....	34
Figura 23- Evolução do fator de capacidade por mês no ano de 2021 .....	35
Figura 24 - Fator de capacidade mês a mês dos principais estados brasileiros .....	36
Figura 25 - Capacidade instalada onshore .....	37
Figura 26- Capacidade instalada offshore .....	38
Figura 27- Crescimento offshore comparado a onshore nos últimos anos .....	39



Figura 28- Novas instalações nos últimos 5 anos.....	40
Figura 29- Nova capacidade de energia eólica por região e participação nos cinco principais mercados.....	40
Figura 30- Estimativa do crescimento da energia eólica nos próximos 5 anos .....	41
Figura 31- Novas energias por região que serão instaladas no mundo de 2022-2026 ...	42
Figura 32- Velocidade média anual do vento a 50 m.....	43
Figura 33- Distribuição da potência instalada no país por fonte de energia.....	46
Figura 34- Geração da fonte eólica mensal .....	47
Figura 35- Geração e representatividade por região nos anos 2020 e 2021 .....	47
Figura 36- Geração por estado detalhados por mês no ano de 2021 .....	48
Figura 37- Ranking de novas capacidades instaladas em 2021 por país .....	49
Figura 38- Evolução do potencial eólico brasileiro.....	49
Figura 39- Ranking da criação de novos parques no Brasil em 2021 .....	50
Figura 40- Evolução da capacidade instalada em 2021.....	51
Figura 41 - Relação quantidade total de leilão contratado x leilão eólica .....	55
Figura 42 - Evolução das Transações de Certificados de Energia Renovável no Brasil	56
Figura 43 - Demonstração da quantidade de usinas por fonte de energia I-REC no mundo e a relação de fontes de energia certificadas no I-REC no Brasil no período de 2014 a 2021.....	57
Figura 44 - Investimentos em novos projetos no setor Eólico (em milhões de US\$) ....	57
Figura 45 - Impactos econômicos positivos com a criação de empregos nos parques eólicos offshore .....	58
Figura 46 - Quantidade de emissões evitadas de CO <sub>2</sub> por mês (Toneladas) .....	59
Figura 47 - Impactos causados pelos geradores eólicos no aumento na temperatura média.....	61
Figura 48 - Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar .....	63
Figura 49 - Comportamento do vento sob a influência das características do terreno ...	64
Figura 50 - Relação velocidade do vento x altura .....	64
Figura 51 - Avaliação da denominação do vento e suas características .....	65
Figura 52 - Componentes de um sistema eólico.....	67
Figura 53 - Principais componentes da nacele vista de cima .....	69
Figura 54 - Principais componentes da nacele vista de baixo .....	70
Figura 55 - Turbinas de eixo vertical do tipo Savonius (a), Darrieus (b), Giromill (c) e Gorlov (d).....	71

Figura 56 - Turbinas de eixo horizontal com uma pá (a), duas pás (b), três pás (c) e multipás (d) .....	72
Figura 57 - Turbinas upwind (a), e downwind (b) .....	73
Figura 58 - Caixa multiplicadora conectada ao gerador (vista à direita).....	74
Figura 59 - Gerador convencional (a), gerador com multipolos (b).....	75
Figura 60 - Esquema elétrico de um gerador com velocidade constante .....	76
Figura 61 - Esquema elétrico de um gerador com velocidade variável que usa um conversor de frequência para o controle da frequência da geração elétrica .....	77
Figura 62 - As principais forças atuantes em uma pá do aerogerador.....	78
Figura 63 - Fluxo de escoamento aderente ao perfil .....	79
Figura 64 - Curva de potência de uma unidade eólica com controle de estol de passo..	80
Figura 65 - Fluxo de escoamento separado em volta do perfil.....	80
Figura 66 - Curva de potência de uma unidade eólica com controle de estol .....	81
Figura 67 - Aplicações dos sistemas eólicos quanto ao tamanho dos aerogeradores.....	82
Figura 68 - Configuração de um sistema eólico isolado .....	83
Figura 69 - Configuração de um sistema híbrido .....	84
Figura 70 - Configuração de um sistema interligado à rede – Parque Eólico da Prainha – CE.....	84
Figura 71 - Anemômetro digital (a) e anemômetro analógico (b).....	85
Figura 72 - Velocidade/altura.....	86
Figura 73 - Atuação da velocidade do vento em função do tempo .....	88
Figura 74 - Histograma de dados do vento.....	89
Figura 75 - Influência do parâmetro de forma k na curva de distribuição de Weibull...	90
Figura 76 - Influência da velocidade média na curva de distribuição de Rayleigh.....	91
Figura 77 - Fluxo de ar através de uma área transversal A .....	92
Figura 78 - Equipamentos e materiais utilizados.....	96
Figura 79 - Construção da maquete.....	99
Figura 80 - Medições da velocidade do vento utilizando anemômetro digital .....	100
Figura 81 - Medições da velocidade do vento utilizando anemômetro digital.....	101
Figura 82 - Frequência de Rayleigh nas velocidades do vento utilizando anemômetro .....	101
Figura 83 - Frequência de Rayleigh em determinadas velocidades média.....	101
Figura 84 - Frequência de Rayleigh obtida .....	102
Figura 85 - Fórmulas para cálculos de potência.....	102
Figura 86 - Valores de potência obtidos pelo sistema.....	103

Figura 87 - Luzes dos leds acesas utilizando energia elétrica do gerador eolioelétrico	103
Figura 88 - Valores de tensão e corrente elétrica encontrados .....	104
Figura 89 - Valores máximos encontrados para corrente (a) e para tensão (b) .....	104
Figura 90 - Características da forma de onda do motor (a), da forma de onda do motor após o diodo (b).....	105
Figura 91 - Característica de onda da corrente contínua após o capacitor .....	105

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	12
1.1 Objetivo .....	13
1.2 Objetivos específicos .....	13
1.3 Metodologia .....	13
2. Princípios da geração eólioelétrica .....	14
2.1 História da Energia Eólica no mundo e suas utilizações.....	21
2.2 Parque <i>onshore</i> .....	29
2.2.1 Parque <i>offshore</i> .....	32
2.2.2 Fator de Capacidade.....	34
2.3 Capacidade Instalada Mundial .....	37
2.3.1 Evolução de potencial mundial .....	38
2.3.2 Evolução mundial de 2022 a 2026 .....	41
2.4 Energia Eólica no Brasil.....	42
2.4.1 Potencial Brasileiro.....	44
2.4.2 Capacidade Instalada no Brasil.....	46
2.4.3 Geração de energia por Região e Estado .....	47
2.4.4 Evolução da capacidade instalada.....	48
2.4.5 Transição Energética .....	52
2.4.6 Sistema Interligado Nacional (SIN).....	53
2.4.7 Leilão .....	53
2.4.8 Certificado de Energia Renovável.....	55
2.5 Impactos e contribuições econômicas .....	57
2.6 Impactos e contribuições ambientais e socioambientais .....	58
2.7 O vento .....	62
2.8 Sistemas Eólicos.....	65
2.8.1 Nacele.....	67

2.8.2 Rotores .....	70
2.8.2.1 – Eixo Vertical.....	70
2.8.2.2 – Eixo Horizontal.....	71
2.8.3 Transmissão e caixas de engrenagem .....	73
2.8.4 Geradores .....	74
2.8.4.1 Aerogerador com velocidade constante .....	76
2.8.4.2 Aerogerador com velocidade variável.....	76
2.8.5 Mecanismo de controle.....	77
2.8.5.1 – Controle de Passo .....	78
2.8.5.2 – Controle Estol .....	80
2.8.6 Torre .....	81
2.8.7 Tipo de construção .....	81
2.9 Aplicações dos sistemas eólicos .....	82
2.9.1 Sistemas autônomos ou isolados .....	82
2.9.2 Sistemas híbridos.....	83
2.9.3 Sistemas interligados à rede .....	84
2.10 Medições da velocidade do vento.....	84
2.11 Avaliação da produção de energia elétrica .....	86
2.11.1 Distribuições de Weibull.....	88
2.11.2 Distribuições de Rayleigh .....	91
2.12 Energia e potência extraídas do vento .....	91
3 Projeto .....	95
3.1 Montagem do Sistema .....	98
3.1.2 Testes no sistema .....	99
4 Conclusão .....	106
5 Referência Bibliográfica.....	108

## 1. Introdução

A atividade humana é dependente das fontes de energia para o desenvolvimento de suas atividades, manipulando-as, através do tempo conforme a necessidade. Iniciando sua manipulação com a descoberta do fogo, o homem pré-histórico deu um salto nas suas rudes condições de vida, possibilitando o preparo dos alimentos, mantendo aquecidos e iluminando seus abrigos.

A importância da energia pode ser entendida a partir da constatação do papel que ela exerce em todas as atividades humanas. Pela sua evidência, desde as sociedades primitivas até o presente. Utilizando-se das fontes de energia disponíveis, continuou o homem a evoluir.

A partir do século XVII e XVIII, com o desenvolvimento e utilização de máquinas movidas a vapor, e dos motores de combustão interna, é que notamos um grande avanço na utilização de energia para melhoria da produção. O desenvolvimento das máquinas a vapor e dos motores de combustão interna proporcionou um incremento significativo da potência e eficiência nas máquinas existentes, e que levaram à produção de novas unidades, com elevado aumento da produtividade. O consumo de combustíveis, antes limitado às atividades domésticas e de subsistência, como aquecimento e preparação de alimentos, cresceu, exponencialmente.

Com a recente evolução tecnológica, o homem necessita cada vez mais de energia, em todas as suas formas, com o crescimento da utilização de combustíveis fósseis, consubstanciando-se assim a matriz energética mundial.

A atual utilização de fontes energéticas fósseis responde por aproximadamente 80% da energia consumida no Planeta. Já é de nosso conhecimento que as reservas dos combustíveis fósseis são finitas, e não renováveis. Diminuem as reservas conhecidas, na proporção inversa do crescimento do consumo.

Com as previsões de exaustão das fontes baseadas nos hidrocarbonetos, a Ciência procura alternativas energéticas, no rico manancial oferecido pela natureza, este abundante, limpo e renovável.

A política das nações não produtoras de petróleo, em relação às nações com rica ocorrência de bacias petrolíferas, e constatação das consequências de sua utilização, para

o meio ambiente, forçaram a busca por fontes de energia renovável, com custos financeiros potencialmente mais baixos, nos médio e longo prazos.

A exploração dos recursos naturais para a manutenção do desenvolvimento despertou interesse pela energia elétrica devido as frequentes crises no setor energético, conseqüentemente, um interesse pelo desenvolvimento de energias alternativas como energia eólica, solar e biomassa.

Este trabalho tem como objetivo a caracterização da crescente demanda da produção de energia através da fonte eólica, como seus princípios e suas tecnologias.

### **1.1 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de geração de energia eólioelétrica e evidenciar os principais conceitos tecnológicos dessa energia alternativa.

### **1.2 Objetivos específicos**

Considerando o desenvolvimento do projeto e objetivo apresentado, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Caracterização da crescente demanda da produção de energia através da fonte eólica;
- Apresentar os princípios da tecnologia eólioelétrica e sua evolução;
- Explicar a diferença entre parque Onshore e Parque Offshore;
- Demonstrar de forma prática, através da construção de um mini aerogerador, o funcionamento de uma turbina eólica e sua eficiência de transformação de potência.

### **1.3 Metodologia**

Para alcançar os objetivos da pesquisa, as etapas abaixo serão adotadas:

- I. Retirar o motor de um ventilador convencional monofásico e realizar a desmontagem dele.
- II. Colocar ímãs em seu rotor para induzir tensão elétrica reversa no estator.
- III. Acoplar uma hélice no rotor.
- IV. Medições de Tensão e Corrente nos terminais de saída do motor através de um multímetro.
- V. Conectar o osciloscópio nos terminais de saída do motor, para análise de onda.
- VI. Adicionar um diodo em série e um capacitor em paralelo para a retificação do sinal CA em CC para os carga.
- VII. Conectar o osciloscópio novamente nos terminais de saída do motor, para análise de onda.
- VIII. Confecção de uma maquete para dispor os leds como carga.

## 2. Princípios da geração eólioelétrica

O consumo de energia elétrica nos últimos anos tem crescido nas áreas industriais, comerciais e residenciais. Esse crescimento tem levado os governos de todo o mundo a traçarem uma estratégia de fornecimento de energia a curto e longo prazos. A preocupação com o aumento do consumo e as questões ambientais têm justificado um planejamento mais rigoroso quanto às novas formas de fornecimento de energia. É nesse contexto que as fontes renováveis de energia têm aumentado a sua importância de modo global. O uso de fontes alternativas não se limita mais a comunidades isoladas que haviam sido o seu principal nicho de aplicação. Aplicações efetivas de fontes alternativas de energia, como a energia solar fotovoltaica, energia de biomassa, pequenas centrais hidrelétricas, energia eólica etc., têm sido dirigidas para as comunidades isoladas, principalmente para aquelas que se encontram afastadas da rede convencional de energia elétrica (DUTRA, Ricardo Marques, 2001).

A emissão de gases de efeito estufa (GEE) vem tornando-se uma das questões mais relevantes diante da crescente preocupação mundial com as mudanças climáticas globais, especialmente o aquecimento do planeta, devido a forte predominância dos hidrocarbonetos nos sistemas energéticos. No Brasil, tivemos um aumento de 9,5% das emissões de GEE em 2020, ano em que a pandemia da Covid-19 parou a economia mundial e causou a redução de aproximadamente 7% nas emissões globais. O país ficou oposto ao resto do mundo e em 2021, o país teve um aumento de 12,16% em relação ao ano anterior.

Vemos na figura 1, que as mudanças de uso da terra foram responsáveis pela maior fatia das emissões de GEE do Brasil em 2021 representando 49% do total bruto, ou 1.188 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente ( $\text{MtCO}_2\text{e}$ ). Em seguida vêm a agropecuária, com 24,8% das emissões brutas ( $600,7 \text{ MtCO}_2\text{e}$ ), o setor de energia com 17,9% ( $434,6 \text{ MtCO}_2\text{e}$ ) e os processos industriais com 4,5% do total ( $107,9 \text{ MtCO}_2\text{e}$ ) quase empatado com o setor de resíduos, que detém 3,8% das emissões brutas ( $91,1 \text{ MtCO}_2\text{e}$ ).



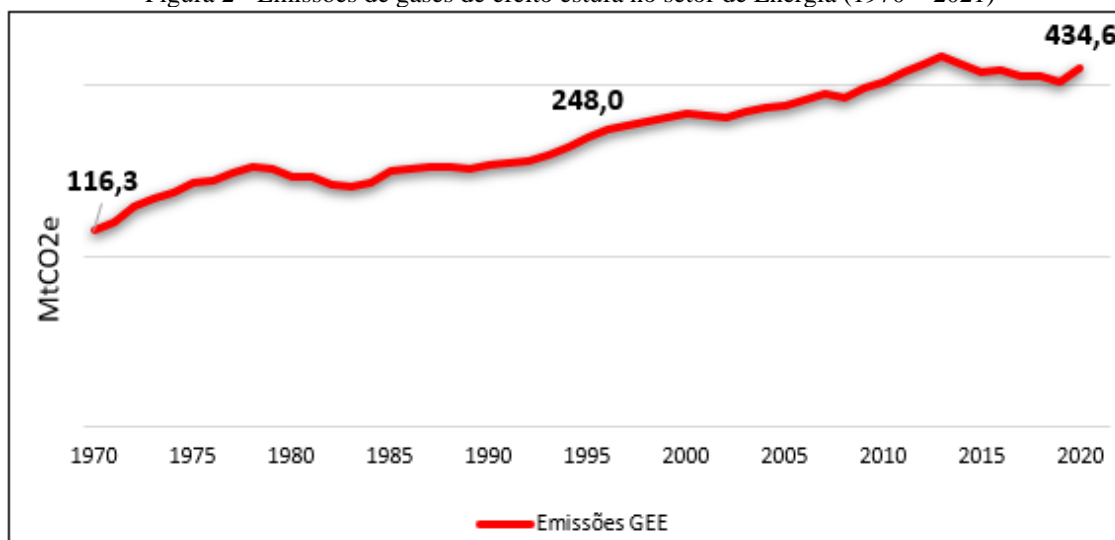
Figura 1 - Emissões de dióxido de carbono no Brasil em 2020 e 2021 (tCO<sub>2</sub>e)

Setores	2020	%	2021	%	Varição 2020-2021
Mudança de uso da terra	1.002.834.673	46,4	1.188.188.576	49,0	18,48
Agropecuária	578.848.353	26,8	600.759.215	24,8	3,79
Energia	387.413.184	17,9	434.607.259	17,9	12,18
Processos Industriais	99.733.400	4,6	107.948.489	4,5	8,24
Resíduos	91.235.395	4,2	91.121.526	3,8	-0,12
<b>Total</b>	<b>2.160.065.005</b>		<b>2.422.625.067</b>		<b>12,16</b>

Fonte: do autor a partir Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), 2022.

Em 2021, o setor de energia totalizou 434,6 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> e emitidas, representando um aumentando 12,18% em 2021, como mostrado na figura 2.

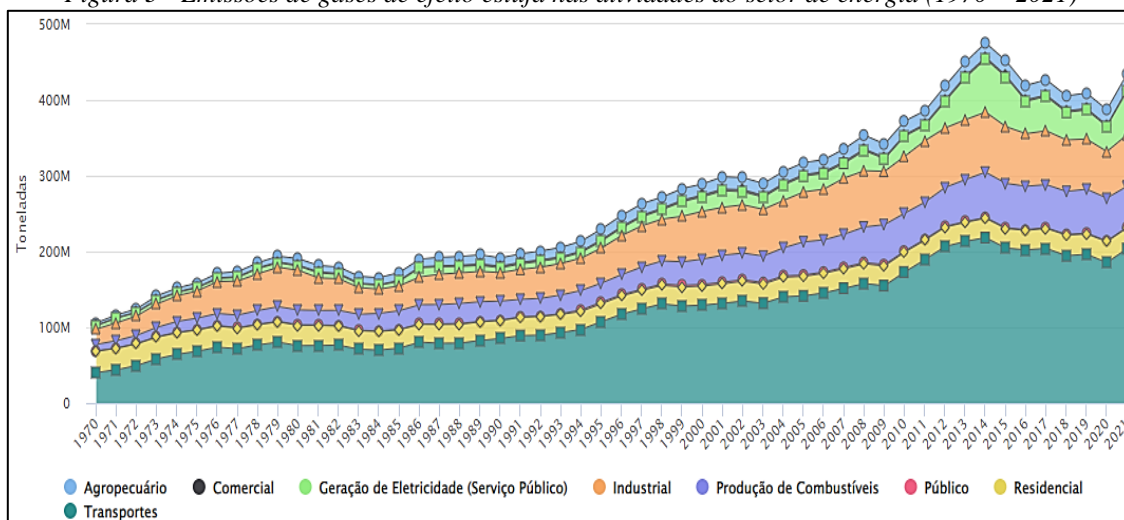
Figura 2 - Emissões de gases de efeito estufa no setor de Energia (1970 – 2021)



Fonte: do autor a partir do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), 2022.

Os principais emissores são procedentes da queima de combustíveis como de transporte, indústria e geração de eletricidade, além das emissões fugitivas, estas causadas pela evasão de GEE durante a produção de combustíveis, como o escape de metano na exploração do petróleo e gás natural. Na figura 3, podemos ver a evolução das principais atividades emissoras do setor de energia.

Figura 3 - Emissões de gases de efeito estufa nas atividades do setor de energia (1970 – 2021)



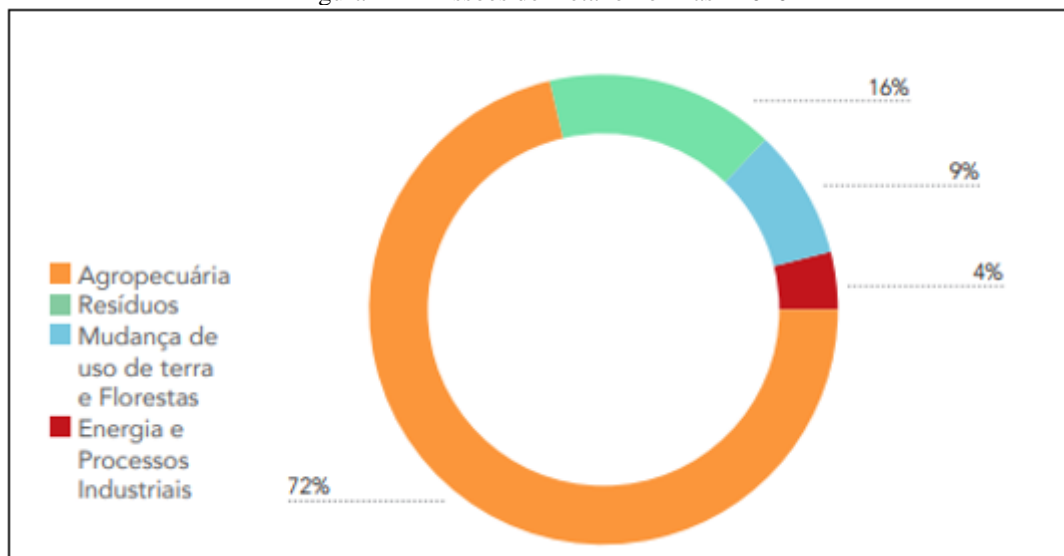
A elevação em energia há uma série de fatores e um deles é a retomada da economia após a fase mais grave da pandemia de Covid-19, onde as emissões voltaram a subir rapidamente em 2021. Outros fatores explicam uma das maiores altas de emissões nos 50 anos no setor, como a crise hídrica, decorrente da pior estiagem em nove décadas no Centro-Sul do país. Um terceiro fator, também decorrente da seca, foi a queda na safra de cana no Sudeste, que levou a uma alta do preço do etanol — reduzindo, consequentemente, a participação do biocombustível nos transportes.

O metano ( $\text{CH}_4$ ) também é um poderoso gás de efeito estufa e o segundo maior responsável pelo aquecimento global. Cada tonelada de metano tem 28 vezes mais potencial de esquentar o planeta em cem anos do que uma tonelada de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o maior causador da crise climática (SEEG, 2022).

As emissões brasileiras de metano em 2020 foram estimadas pelo SEEG em 20,2 milhões de toneladas em 2020, o que corresponde a 26% das emissões totais de gases de efeito estufa do país. Depois de um período de queda entre 2004 e 2008 as emissões de metano vêm subindo gradativamente. A principal fonte de metano no Brasil é a agropecuária, com aproximadamente 72% das emissões (com destaque para a fermentação entérica, manejo de dejetos e produção de arroz irrigado), seguida do tratamento de resíduos, com 16%, e mudanças de uso da terra com 9%. Energia e processos industriais contribuem com 4% das emissões. Ver figura 4.

O Brasil é o quinto maior emissor de metano do mundo. Sozinho ele emite o equivalente a 5,5% do metano do planeta, enquanto a participação do país nas emissões gerais de gases de efeito estufa é de 3,3%.

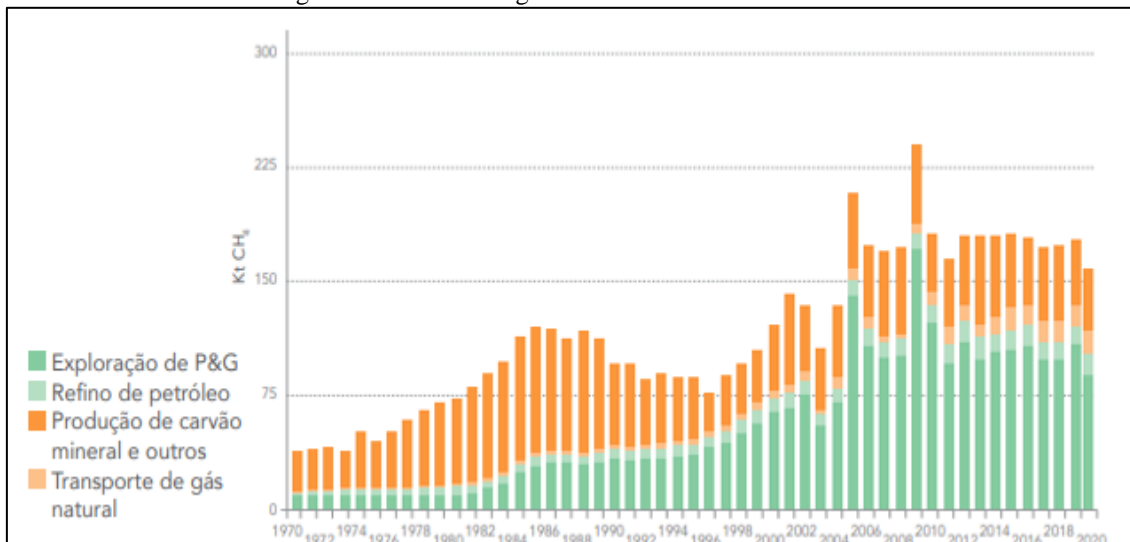
Figura 4 - Emissões de metano no Brasil 2020



Fonte: SEEG, 2022.

Estima-se que aproximadamente 572 mil toneladas de metano foram emitidas no setor de energia em 2020, correspondendo a 2,6% do total das emissões antrópicas do gás pelo Brasil no ano. Dessas emissões, 414 mil ocorreram pela queima de combustíveis e 158 mil foram emissões fugitivas. Na queima de combustíveis, a lenha é responsável pela grande maioria das emissões e para as emissões fugitivas, o destaque são as emissões da exploração de petróleo e gás natural. Praticamente inexistente na década de 1970 e impulsionada pela descoberta do Pré-Sal na década de 2000, a exploração de petróleo e gás natural causou elevação nas emissões de metano até 2009 e, a partir de então, passou a oscilar em torno do patamar de 100 mil toneladas como podemos ver figura 5.

Figura 5 - Emissões fugitivas de metano no Brasil 2020

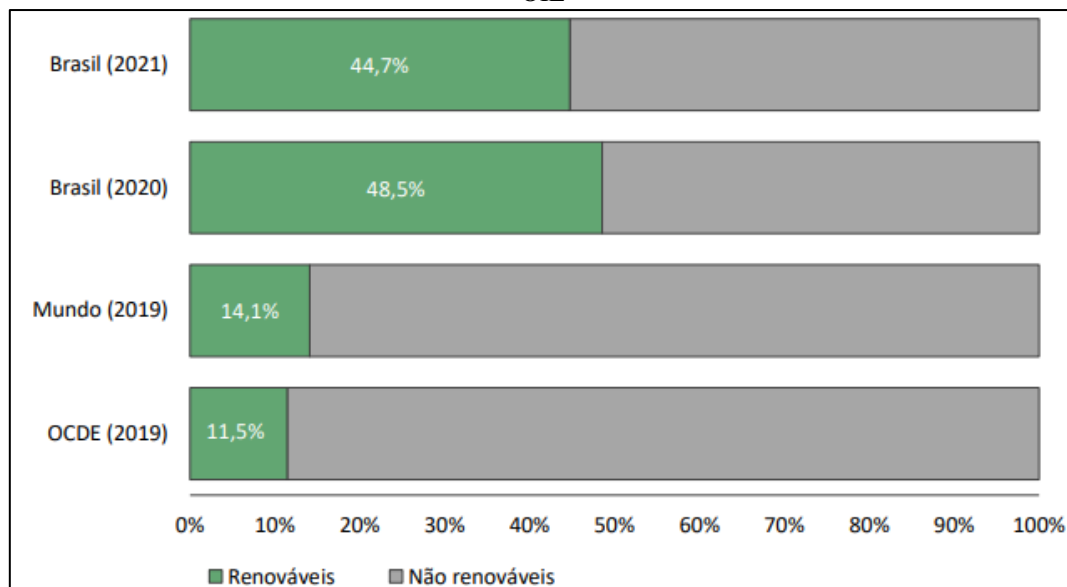


Fonte: SEEG, 2022.

Com o intuito de mitigar as mudanças climáticas e para ajudar a humanidade a ganhar tempo para fazer a transição energética para uma economia sem combustíveis fósseis e, assim, manter viva a meta do Acordo de Paris de limitar o aquecimento da Terra a 1,5 °C em relação à era pré-industrial, o mundo vem buscando soluções para encontrar tecnologias que ofereçam segurança energética por preços acessíveis e baixos impactos ambientais e, neste caso, a energia eólica vem sendo uma boa opção.

A participação de renováveis na Oferta Interna de Energia (OIE) em 2021, declinou-se devido à escassez hídrica e ao acionamento das usinas termelétricas. Na figura 6, vemos o comparativo da OIE quando comparado ao resto do mundo e a OCDE (Organização para Cooperação de Desenvolvimento Econômico).

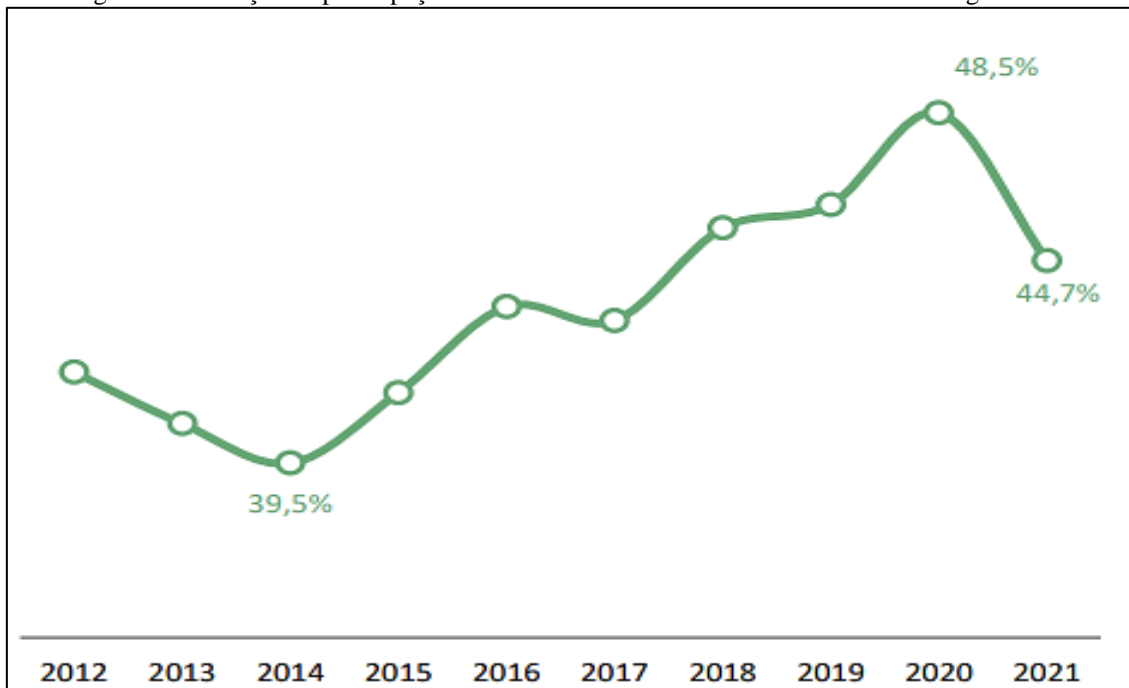
Figura 6 - Comparação internacional da participação de fontes renováveis na Oferta Interna de Energia - OIE



Fonte: Balanço Energético Nacional - BEN, 2022.

Nos últimos 20 anos, a participação das energias renováveis na OIE vem se mantendo estável com valores superiores a 39%. De 2012 a 2014, com a crise hídrica no país, tivemos uma redução da participação das renováveis devido à queda da oferta hidráulica. Pouco depois, em 2015, as energias renováveis retornam ao cenário com crescimento devido a demandas derivadas da cana, eólica e biodiesel, alcançado assim, uma participação de 48,5% em 2020. No ano seguinte, a escassez de chuvas provocou novamente uma redução do nível dos reservatórios das principais hidrelétricas do país e a consequente redução da oferta de hidreletricidade reduzindo em 3,8% como mostrado na figura 7.

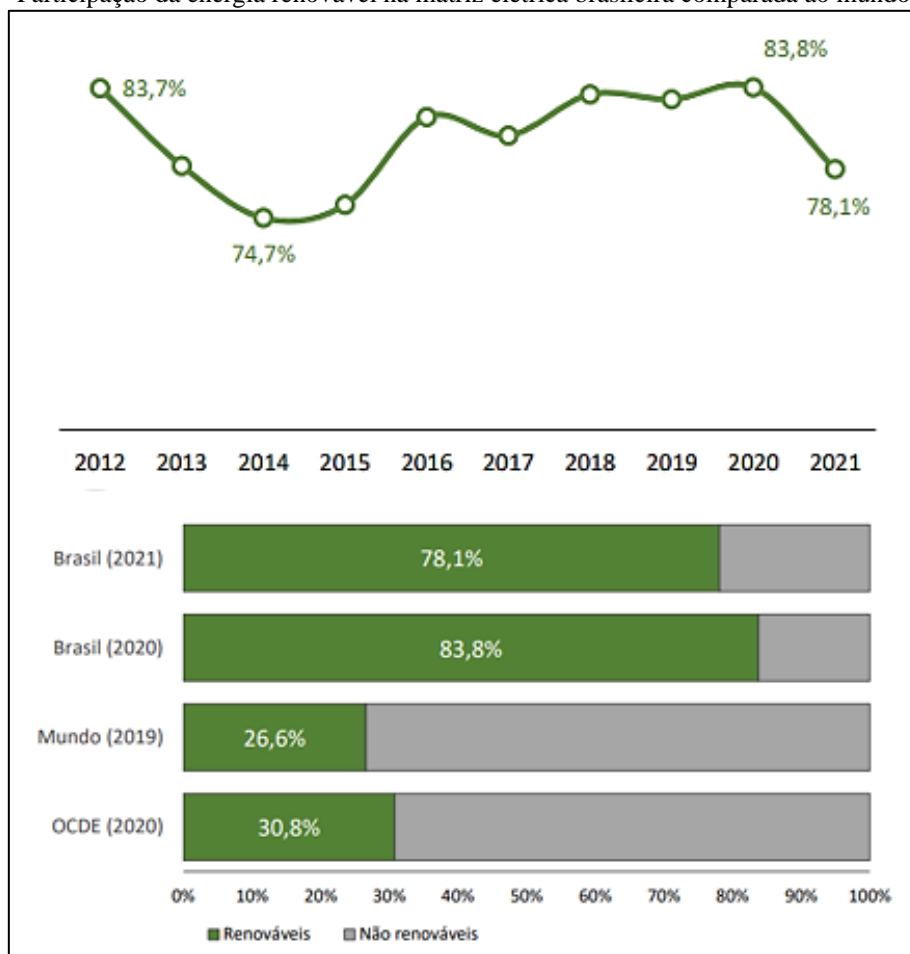
Figura 7 - Evolução da participação das fontes renováveis na Oferta Interna de Energia – OIE



Fonte: Balanço Energético Nacional - BEN, 2022.

Já na matriz elétrica, que é formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica, a participação de renováveis atingiu 78,1% de rentabilidade em 2021, uma diminuição de 5,7 % em relação a 2020. Podemos analisar na figura 8 que, em 2014, a porcentagem atingiu o menor valor nos últimos 10 anos, isto é, devido à crise hídrica, mostrando assim, o potencial da hidrelétrica na matriz. Diferente do mundo e da OCDE, o Brasil é um exemplo em produção de energia limpa.

Figura 8 - Participação da energia renovável na matriz elétrica brasileira comparada ao mundo e a OCDE



Fonte: Balanço Energético Nacional - BEN, 2022.

## 2.1 História da Energia Eólica no mundo e suas utilizações

A utilização da energia eólica pode ser datada de 5000 a.C. quando os barcos a vela eram impulsionados no rio Nilo, mas de acordo com várias fontes, o primeiro registro se dá com os moinhos de ventos no Oriente Médio. Estes moinhos de vento eram principalmente usados para bombear água ou para moer trigo, tinham eixo vertical e usavam o componente de arrasto da força do vento. Mesmo com baixa eficiência devido a suas características, os cata-ventos primitivos apresentavam vantagens importantes para o desenvolvimento da civilização substituindo a força motriz humana ou animal. Ver figura 9.

Figura 9 - Moinho de vento persa na cidade de Neh. A pedra do moinho está abaixo do rotor e as velas estão fixadas nas palhetas (a), vista frontal dos moinhos persas (b)



Fonte: do autor a partir de SHEPHERD, 1990 e AMBROSIO & MEDAGLIA, 2010.

A introdução dos cata-ventos na Europa deu-se, principalmente, no retorno das Cruzadas há 900 anos. Os cata-ventos foram largamente utilizados e seu desenvolvimento bem documentado. As máquinas primitivas persistiram até o século XII quando começaram a ser utilizados moinhos de eixo horizontal na Inglaterra, França e Holanda, entre outros países. Os moinhos de vento de eixo horizontal do tipo “holandês”, foram rapidamente disseminados em vários países da Europa (SHEPHERD, 1990). Ver figura 10.

Figura 10 - Moinho holandês

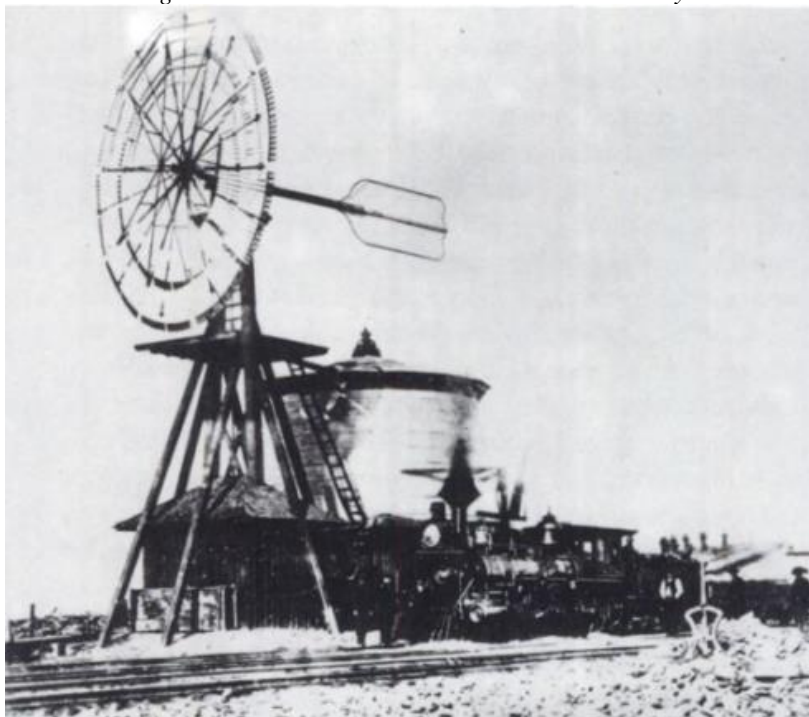


Fonte: AMBROSIO & MEDAGLIA, 2010.

Em 1857, o engenheiro americano Daniel Halladay constrói o primeiro moinho capaz de orientação autônoma, em que quando a direção do vento varia, altera-se a inclinação da hélice para manter a velocidade constante, mas sua utilização teve declínio no século XVIII após a Revolução Industrial. Ver figura 11.

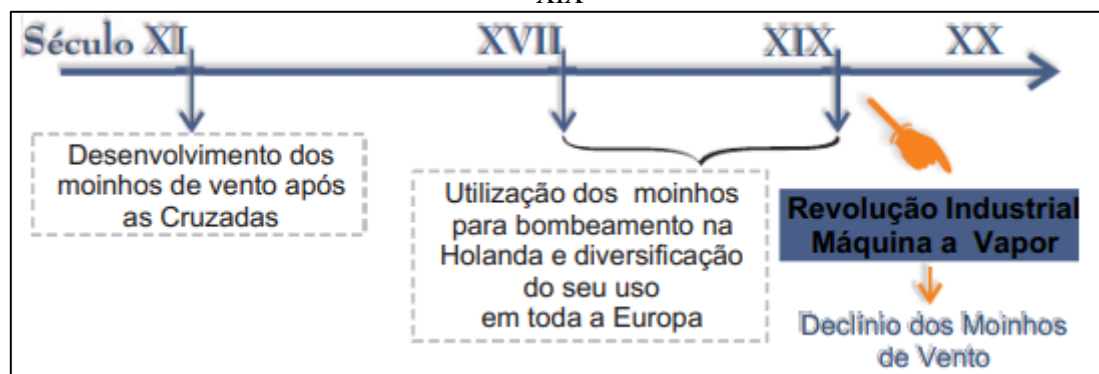


Figura 11 - Moinho americano de Daniel Halladay



Fonte: RIGHTER, Robert W., 1996.

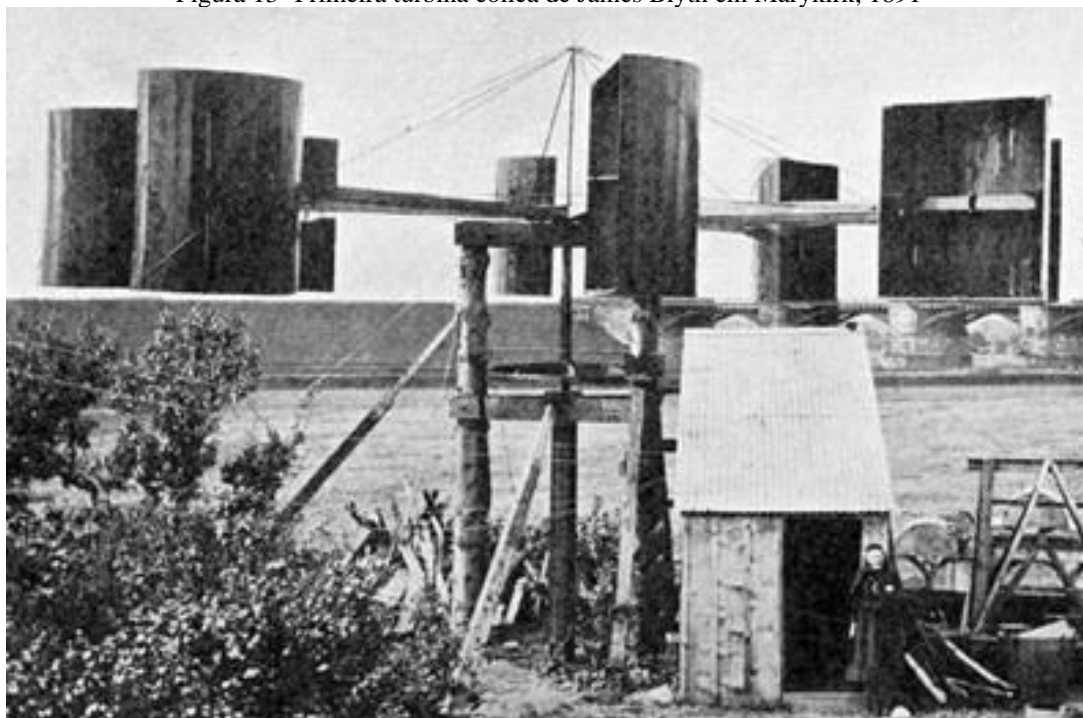
Figura 12 - Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no período do Século XI ao Século XIX



Fonte: Dutra, 2001.

Em 1887, o escocês James Blyth inventa a primeira turbina eólica que produz eletricidade, instalando-a em sua horta e oferecendo o excesso produzido para iluminar a rua de Marykirk conforme figura 13.

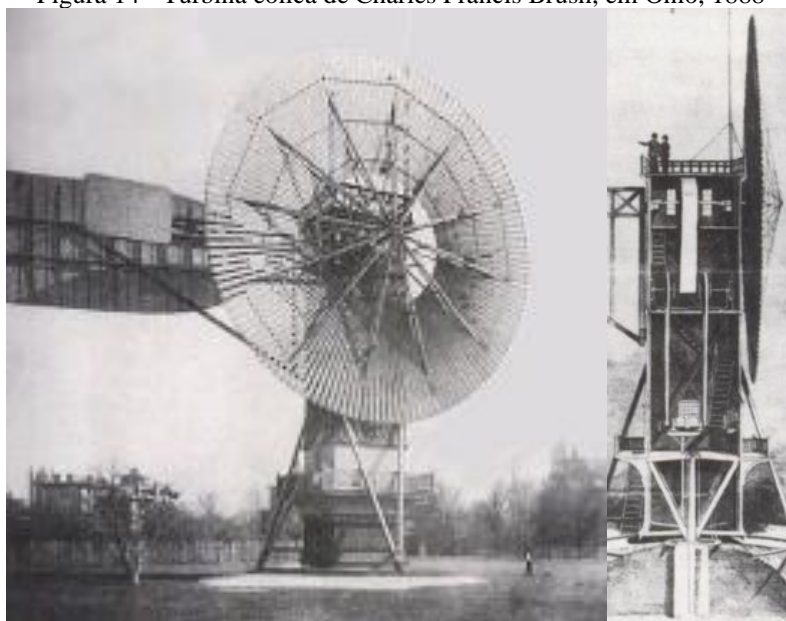
Figura 13- Primeira turbina eólica de James Blyth em Marykirk, 1891



Fonte: Scottish Engineering Hall of Fame, 2022.

Alguns meses após a construção do primeiro gerador eólico de Blyth, o americano Charles F. Brush construiu a primeira turbina eólica operada automaticamente como mostrado na figura 14, que permitiu que ela fosse desligada manualmente para protegê-la contra ventos mais fortes. Tal marco permitiu que Brush recarregasse 408 baterias no porão de sua mansão.

Figura 14 - Turbina eólica de Charles Francis Brush, em Ohio, 1888



Fonte: RIGHTER, Robert W., 1996.

O invento de Brush apresentava três importantes inovações para o desenvolvimento no uso da energia eólica para geração de energia elétrica. Em primeiro lugar, a altura utilizada pelo invento estava dentro das categorias dos moinhos de vento utilizados para beneficiamento de grãos e bombeamento d'água. Em segundo lugar, foi introduzido um mecanismo de grande fator de multiplicação da rotação das pás (50:1) que funcionava em dois estágios possibilitando um máximo aproveitamento do dínamo cujo funcionamento estava em 500 rpm. Em terceiro lugar, esse invento foi a primeira e mais ambiciosa tentativa de se combinar a aerodinâmica e a estrutura dos moinhos de vento com as recentes inovações tecnológicas na produção de energia elétrica (DUTRA, 2001).

O cientista dinamarquês Poul la Cour fornece eletricidade para áreas rurais dos Estados Unidos produzida pelas turbinas eólicas. No final da década de 1930, essas turbinas eólicas se desenvolveram em máquinas geralmente confiáveis e de longa duração dada a manutenção razoável. Eles não tinham, no entanto, o desempenho ou a relação custo-benefício (muito menos a capacidade de produzir energia CA) para competir com estações centrais como fonte de eletricidade. Isso pouco importava em áreas periféricas até a Lei de Eletrificação Rural de 1937, promulgada como parte da administração Roosevelt, programa para tirar a nação da Grande Depressão. Com a construção de novas centrais elétricas, muitas delas hidrelétricas, subsidiou-se a instalação de vastos sistemas de distribuição elétrica a partir dessas usinas com empréstimos a juros baixos. Incapaz de competir com a energia da estação central disponível em quase todos os lugares, a turbina eólica autônoma gerando corrente contínua de baixa tensão foi extinta nos Estados Unidos na década de 1940, exceto em lugares mais remotos (SHEPHERD, 1990).

Em outubro de 1973, a economia mundial é fortemente abalada pelo choque das altas sucessivas do preço do petróleo. O primeiro aumento do petróleo eleva o preço do barril de US\$ 1,77 em 1972, para US\$ 11,65 em novembro de 1973. Os sucessivos choques do preço do petróleo propiciaram a retomada de investimentos em energia eólica. As pesquisas e investimentos estavam direcionados ao uso de aerogeradores conectados a redes operadas por usinas termelétricas. Com o aumento do combustível, o custo da energia gerada em usinas termelétricas justificava economicamente a retomada de investimentos no setor eólico de grande porte. Países como Estados Unidos, Alemanha e Suécia iniciaram seus investimentos na pesquisa de novos modelos. (DUTRA, Ricardo Marques, 2001).

Um dos primeiros passos no desenvolvimento de usinas eólicas de grande escala para energia elétrica para aplicações de utilidade pública foram tomadas na Rússia em 1931, com a construção chamado de Balaclava, mostrado na figura 15, que era uma turbina com 30 m de diâmetro, 100 kW de potência. Esta máquina é historicamente significativa porque é o mais antigo exemplo conhecido de um gerador movido a vento conectado e complementando um sistema de serviços públicos CA. (SEKTOROV, 1934 apud SHEPHERD, 1990).

Figura 15 - Aeroerador Balaclava, 1931



Fonte: DUTRA, 2001.

Finalmente, em 1975, a Agência Americana de Energia (DOE) junto a National Aeronautics and Space Administration (NASA) atuaram no projeto de construção de um modelo experimental de média escala e de eixo horizontal chamado de Mod-0. Era um aerogerador de 100 kW de potência nominal (com ventos, no eixo do rotor, a 8 m/s), com uma torre de 30,5 m de altura e um rotor de 38,1 m de diâmetro. No fim da década de 1970, outros projetos foram implementados por meio da cooperação NASA-DOE como o projeto Mod-5B, este sendo um aerogerador com 3,5 MW de potência e um diâmetro de 100 m, mostrado na figura 16.

Figura 16 - Turbina eólica Mod-5B instalada na Ilha de Oahu – Hawaii em 1987 no projeto de cooperação DOE/NASA



Fonte: DUTRA, 2001.

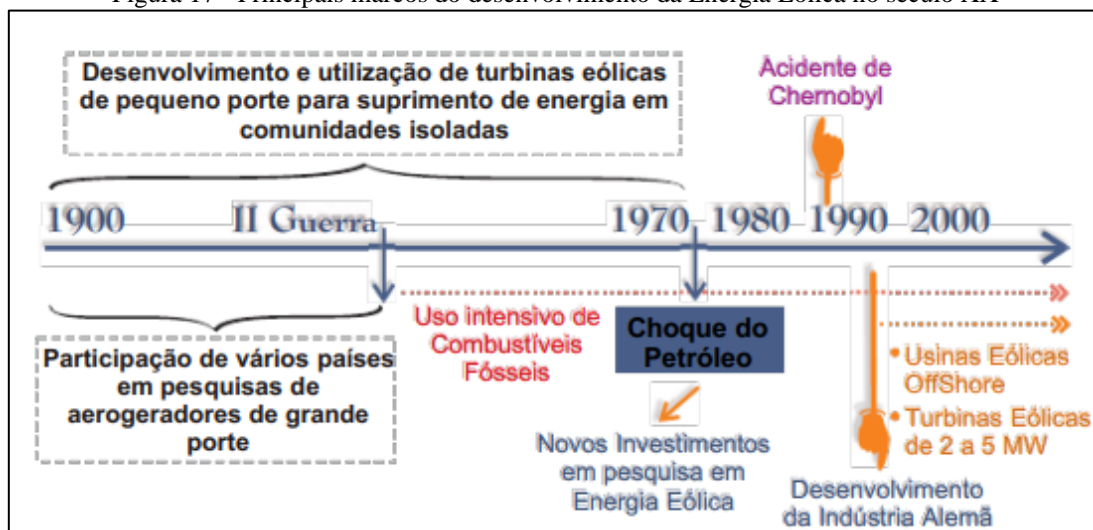
Depois de certa tranquilidade mundial frente à estabilidade do preço do petróleo, novos fatos ocorreram desestruturando novamente as economias dependentes deste insumo – a Revolução Islâmica no Irã, de 1979, e posteriormente, a guerra Irã-Iraque que começou em 1980 e findou em 1988. Certo crescimento de fato ocorreu, mas pouco beneficiou as camadas mais necessitadas pois os gastos feitos eram direcionados para a compra de armamentos, em busca de tornar o Irã uma potência bélica, e além disso, havia muita corrupção na própria monarquia. Por estas e outras insatisfações do povo, surgiu a revolução. (MELO, 2008)

O segundo choque do petróleo (1979-80) triplicou o preço do barril de petróleo e as compras desse produto passaram a representar 46% da pauta de importações brasileiras em 1980. O governo, então, resolve adotar medidas para plena implementação do Proálcool. O Proálcool foi um programa bem-sucedido de substituição em larga escala dos derivados de petróleo. Foi desenvolvido para evitar o aumento da dependência externa de divisas quando dos choques de preço de petróleo. (Biodieserlbr, 2012)

E em 1980, nos Estados Unidos, em New Hampshire, nasce o primeiro parque eólico do mundo composto por 20 turbinas. Na última década, com o crescimento

exponencial desta tecnologia, o custo caiu drasticamente, tornando-a competitiva em comparação às fontes convencionais.

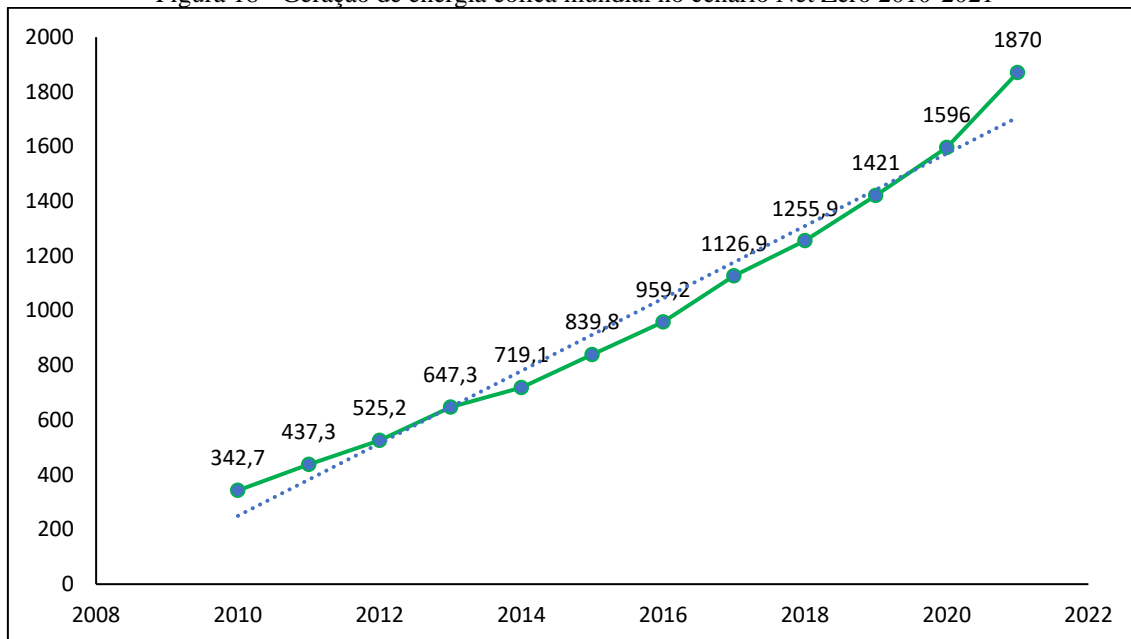
Figura 17 - Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no século XX



Fonte: Dutra, 2001

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), em 2021, a geração de eletricidade eólica aumentou um recorde de 273 TWh (aumento de 17%). Este foi um crescimento 55% maior do que o alcançado em 2020 e foi o mais alto entre todas as tecnologias de energia renovável. Esse rápido desenvolvimento foi possível graças a um aumento sem precedentes nas adições de capacidade eólica, que atingiram 113 GW em 2020, em comparação com apenas 59 GW em 2019. No entanto, para entrar no caminho certo com o Cenário de Emissões Líquidas Zero até 2050, que tem aproximadamente 7.900 TWh de geração de eletricidade eólica em 2030, é necessário aumentar as adições médias anuais de capacidade para quase 250 GW, mais do que o dobro do crescimento recorde de 2020. São necessários esforços muito maiores para alcançar este nível de crescimento sustentado da capacidade, com as áreas mais importantes a serem melhoradas sendo a facilitação da permissão para a energia eólica *onshore* e a redução de custos para a energia eólica *offshore*. De acordo com a figura 18, o vento continua a ser a principal tecnologia renovável não hídrica, gerando 1.870 TWh em 2021, quase tanto quanto todos os outros combinados.

Figura 18 - Geração de energia eólica mundial no cenário Net Zero 2010-2021



Fonte: do autor a partir da IEA, 2022.

A China foi responsável por quase 70% do crescimento da geração eólica em 2021, seguida pelos Estados Unidos, com 14%, e pelo Brasil, com 7%. A União Europeia, apesar do crescimento quase recorde da capacidade em 2020 e 2021, viu a geração de energia eólica cair 3% em 2021 devido a períodos anormalmente longos de condições de vento fraco. Globalmente, o crescimento recorde da geração foi possível graças a um aumento de 90% no crescimento da capacidade em 2020, que atingiu 113 GW, impulsionado pelos prazos de política na China e nos Estados Unidos. Em 2021, no entanto, as adições eólicas diminuíram em um terço na China e em um quarto nos Estados Unidos, parcialmente compensadas pelo crescimento mais rápido em outras partes do mundo, resultando em um crescimento geral da capacidade atingindo 94 GW (IEA, 2022).

## 2.2 Parque *onshore*

Os parques eólicos *onshore* são as infraestruturas encarregadas de gerar energia elétrica a partir do vento que sopra em localizações em terra. São projetados e construídos uma série de elementos capazes de transformar primeiro a energia cinética do vento em energia elétrica, para logo convertê-la em eletricidade apta para consumo, e finalmente integrá-la na rede de distribuição.

A energia elétrica é gerada no aerogerador que é uma estrutura que se sustenta sobre uma fundação de concreto armado para garantir sua estabilidade e funcionalidade. Conta com um controlador que se encarrega de iniciar e parar a turbina de acordo com as

condições climáticas, assim como tem um mecanismo que determina a direção do vento e permite que se oriente corretamente.

De acordo com a IBERDROLA, a força do vento faz girar as pás do aerogerador, que foram projetadas para captarem ao máximo essa energia cinética: podem mover-se inclusive com ventos muito suaves, desde 11 quilômetros por hora. As pás estão unidas à turbina através do cubo, que por sua vez está conectada ao eixo lento, que gira na mesma velocidade das pás (entre 7 e 12 rotações por minuto). Uma multiplicadora eleva essa velocidade mais de 100 vezes e a transfere para o eixo rápido, que se move a mais de 1.500 rotações por minuto. Tal força é transmitida ao gerador (algumas tecnologias utilizam geradores de baixa velocidade acoplados diretamente ao eixo lento), onde a energia cinética se transforma em energia elétrica. E daí passa ao conversor, que a transforma em corrente alternada.

A energia elétrica gerada é de baixa tensão, seguida para um transformador que a eleva para média tensão (entre 20 e 66 kV) permitindo que seja transmitida ao parque. Em seguida é conduzida para a subestação, que converte a energia em corrente de alta voltagem, em torno de 132 kV. Essa eletricidade, já apta para o consumo, é transferida através da linha de evacuação para as instalações ligadas à rede de distribuição, que a leva finalmente às residências. Os parques eólicos normalmente são instalados em áreas rurais despovoadas, isoladas dos núcleos populacionais, para evitar que o ruído incomode os habitantes. Para sua construção, diversos fatores são levados em consideração como o impacto ambiental, o potencial energético da zona, a variação espacial do vento ao longo dos anos e a viabilidade ambiental, legal e territorial.

Nas últimas duas décadas, os avanços tecnológicos permitiram aumentar o desempenho dos aerogeradores em que seus designs favorecem potências cada vez maiores devido seus diâmetros e seus rotores. Podemos observar na figura 19 a evolução dos aerogeradores para parques eólicos *onshore*.



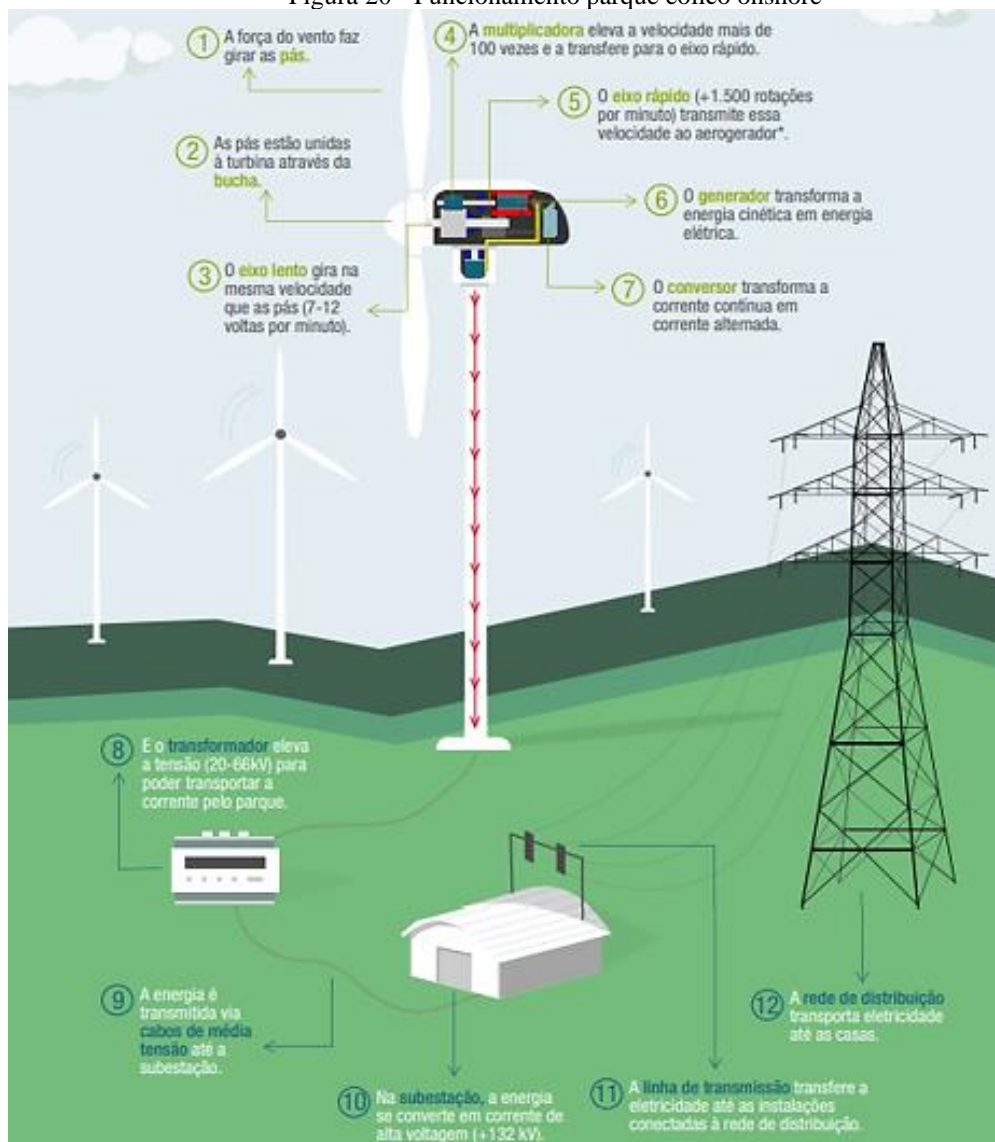
Figura 19 - Evolução dos aerogeradores onshore nas últimas duas décadas



Fonte: IBERDROLA, 2022.

Na figura 20, podemos detalhar melhor o funcionamento do parque *onshore*.

Figura 20 - Funcionamento parque eólico onshore



Fonte: IBERDROLA, 2022.

### 2.2.1 Parque *offshore*

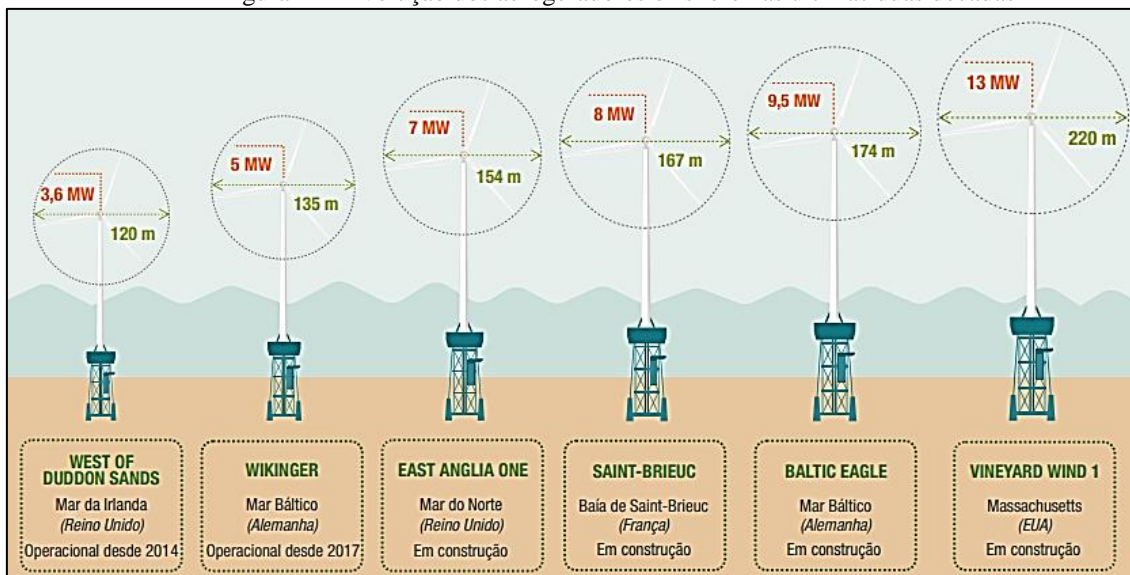
A energia eólica *offshore* é a fonte de energia limpa e renovável que se obtém aproveitando a força do vento que sopra em alto-mar, onde este alcança uma velocidade maior e mais constante, devido à inexistência de barreiras. Para explorar ao máximo esse recurso, são desenvolvidas megaestruturas assentadas sobre o leito marinho e dotadas das últimas inovações técnicas.

Para instalar um parque eólico *offshore*, é necessário um estudo favorável da compatibilidade do parque com outros usos do espaço marítimo e ter uma Declaração de Impacto Ambiental Positiva (DIA). É necessário também realizar estudos muito rigorosos e exigentes durante os anos anteriores que incluem a análise do parque em relação a fauna marinha, avifauna, rotas de migração, navegação, entre outros.

Em relação ao parque eólico *onshore*, a principal diferença está na dificuldade para a sua construção, pois sua obra e manutenção são mais complexas e necessitam de medidas de segurança mais rigorosas além de mão de obra capacitada, o que torna o projeto um pouco mais difícil devido ser uma tecnologia atual e em progresso. Suas vantagens são inúmeras, desde a capacidade de geração e facilidade do transporte marítimo como redução do impacto visual e acústico.

O desenvolvimento de novos tipos de fundações que permitam localizar essas instalações a uma maior distância da costa e a contínua evolução da potência e do desenho dos aerogeradores são apenas alguns dos progressos aos quais presenciaremos nos próximos anos. Na figura 21, vemos que os aerogeradores para parques eólicos tiveram uma brusca evolução nos últimos anos.

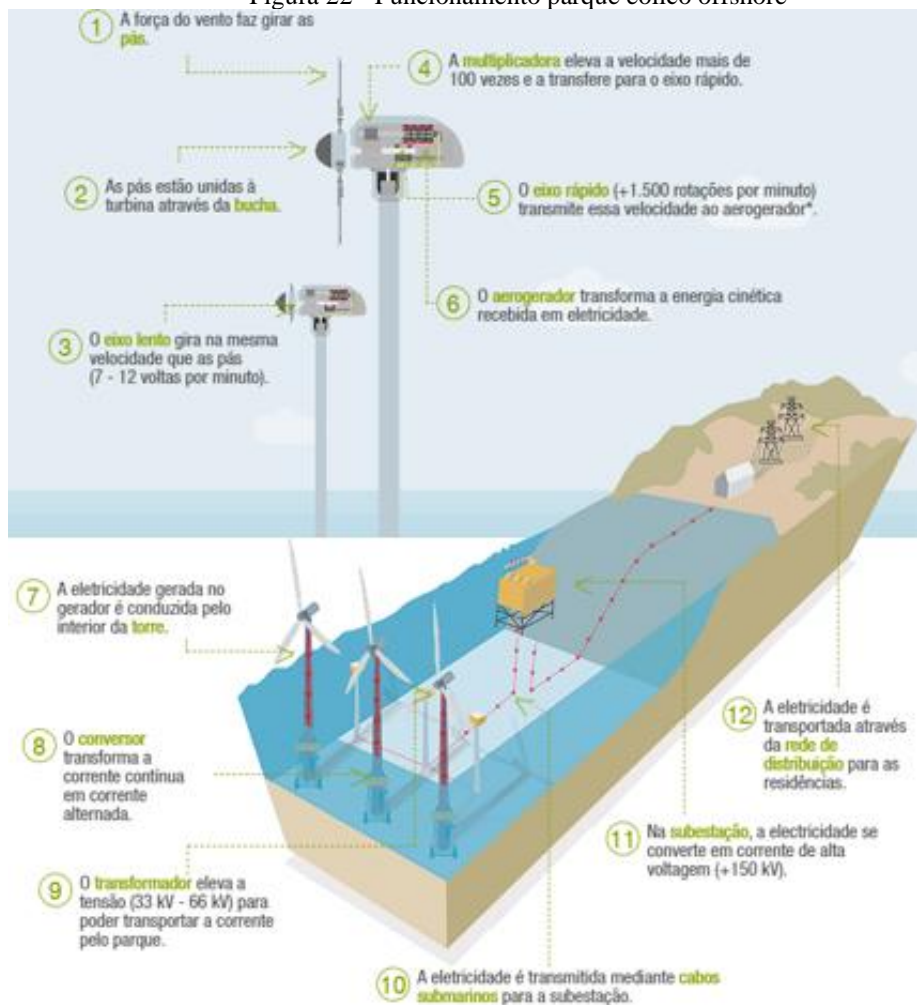
Figura 21 - Evolução dos aerogeradores offshore nas últimas duas décadas



Fonte: IBERDROLA, 2022.

Adiante, vemos na figura 22, o funcionamento de um parque eólico *offshore*.

Figura 22 - Funcionamento parque eólico offshore



Fonte: IBERDROLA, 2022.

## 2.2.2 Fator de Capacidade

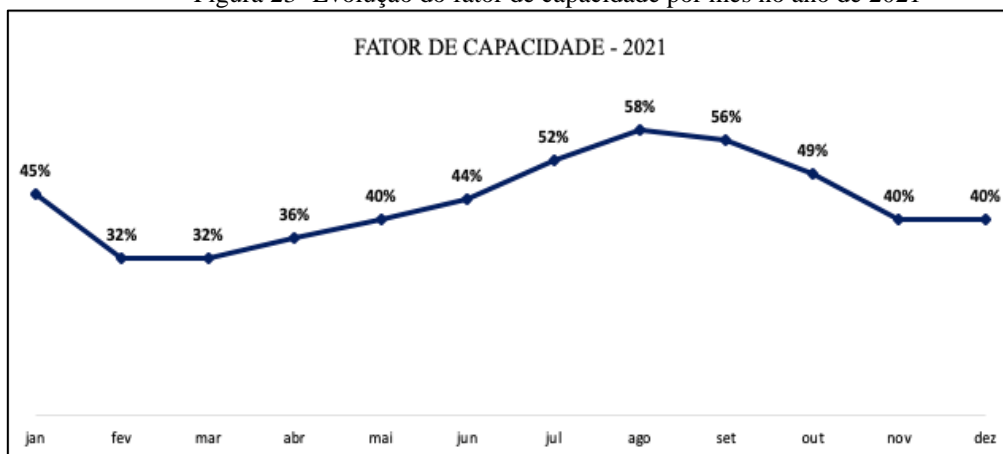
Antes de mais nada, é de extrema importância definir o que é fator de capacidade, dado que mede a produtividade do vento:

O fator de capacidade da fonte eólica representa a proporção entre a geração efetiva da usina em um intervalo de tempo e a capacidade total no mesmo íterim. O valor médio para 2021 foi 43,6%, tendo atingido máximo valor médio mensal em agosto, com 57,9%. (ABEEólica, 2021)

O Brasil é considerado um país com uma boa qualidade no vento. Isso é medido por meio do fator de capacidade, com números chegando perto dos 60% no seu ápice. O nordeste brasileiro apresenta o maior fator de capacidade do país, fato que se deve aos ventos constantes, à velocidade estável e reduzidas mudanças bruscas de direção. O Brasil está farto desse tipo de vento, por isso temos altos valores médios de fator de capacidade. Por exemplo, o Brasil teve valores médios de quase 44%, 10% a mais do que a média mundial, que apresenta um fator de capacidade médio de aproximadamente 34%. Além

disso, nos momentos de ápice do fator de capacidade durante a “safra dos ventos”, o valor é quase o dobro da média mundial. Ver figura 23.

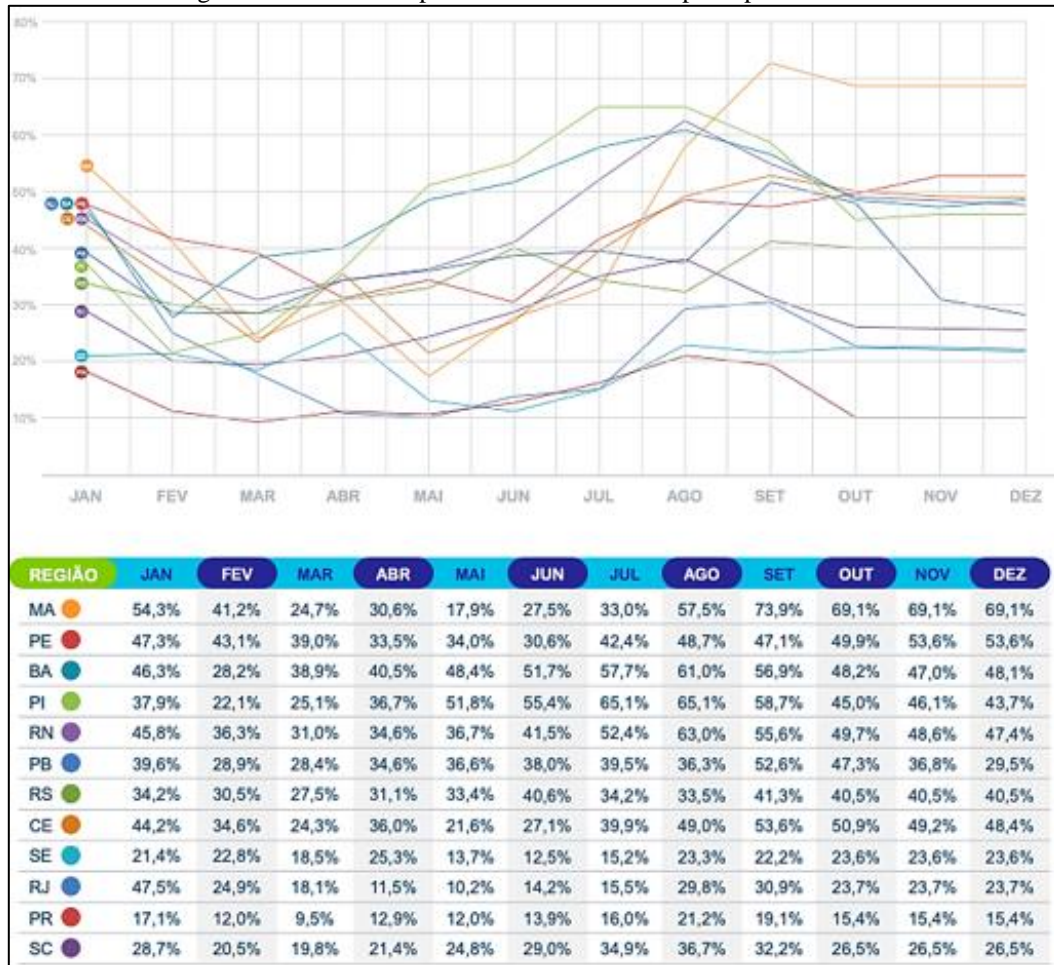
Figura 23- Evolução do fator de capacidade por mês no ano de 2021



Fonte: do autor a partir de ABEEÓLICA, 2021.

Considerando os Estados brasileiros, 5 se destacam no fator de capacidade média: a Bahia, que apresentou um fator médio de 47,7%, o Maranhão, com 47,3%, o Piauí, com 46%, o Rio Grande do Norte, com 45,2%, e o Pernambuco, com 43,6%. A figura a seguir apresenta os dados de fator de capacidade mês a mês dos principais estados brasileiros. (ABEEÓLICA, 2021)

Figura 24 - Fator de capacidade mês a mês dos principais estados brasileiros



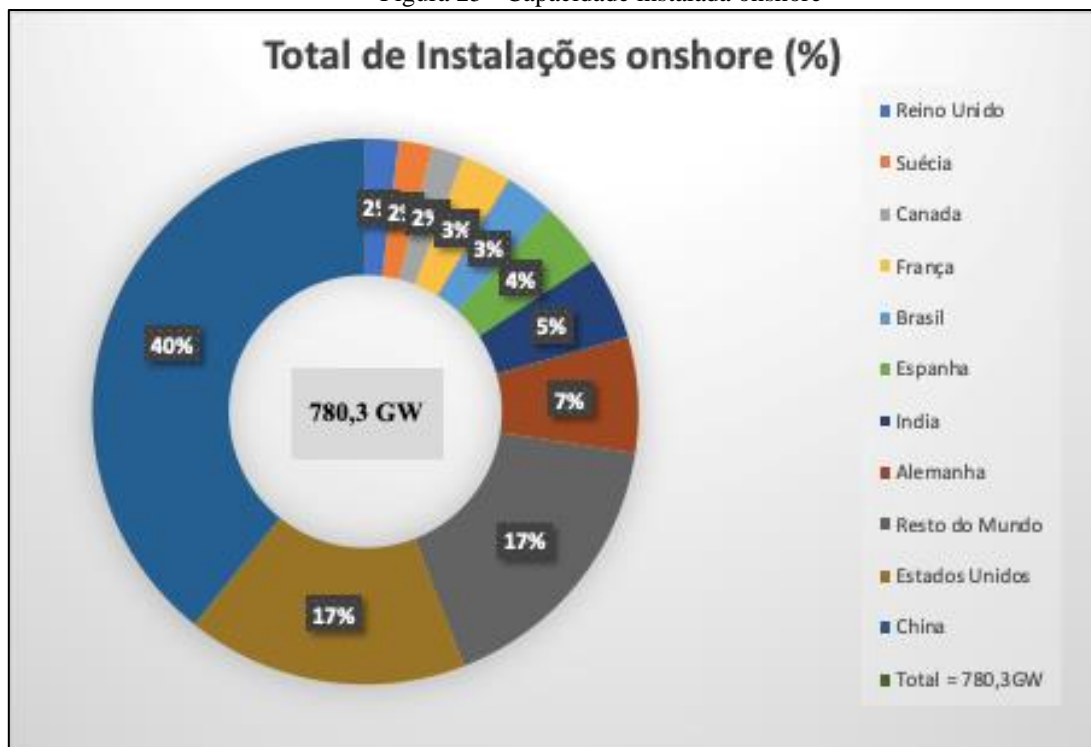
Fonte: ABEEólica, 2022.

Com esses ótimos números de fator de capacidade o Brasil pode passar a explorar ainda mais a eólica para diversificar sua matriz energética, o Brasil sempre foi extremamente dependente das hidrelétricas, o que torna o país vulnerável a períodos de secas, que estão acontecendo cada vez com mais frequência, 55% da geração de energia vem da fonte hídrica. Devido a isso, é fundamental que os investimentos em outras fontes de energia e na complementaridade de fontes, pois, se não fosse a energia eólica crescente nos últimos anos, o Brasil já teria sofrido com problemas de suprimento de eletricidade. O Brasil tem a sorte de suas principais fontes de energia se complementarem, pois os maiores índices de fator de capacidade e melhores ventos do ano ocorrem exatamente na época da seca hídrica e o período de maior chuva ocorre na época em que os ventos mais fracos. Com o crescimento da energia eólica, ela pode ser utilizada para suprir a parte hídrica, mantendo os reservatórios abastecidos por mais tempo e reduzindo os efeitos adversos causados pela estiagem na geração de energia. (ABEEólica, 2022d)

## 2.3 Capacidade Instalada Mundial

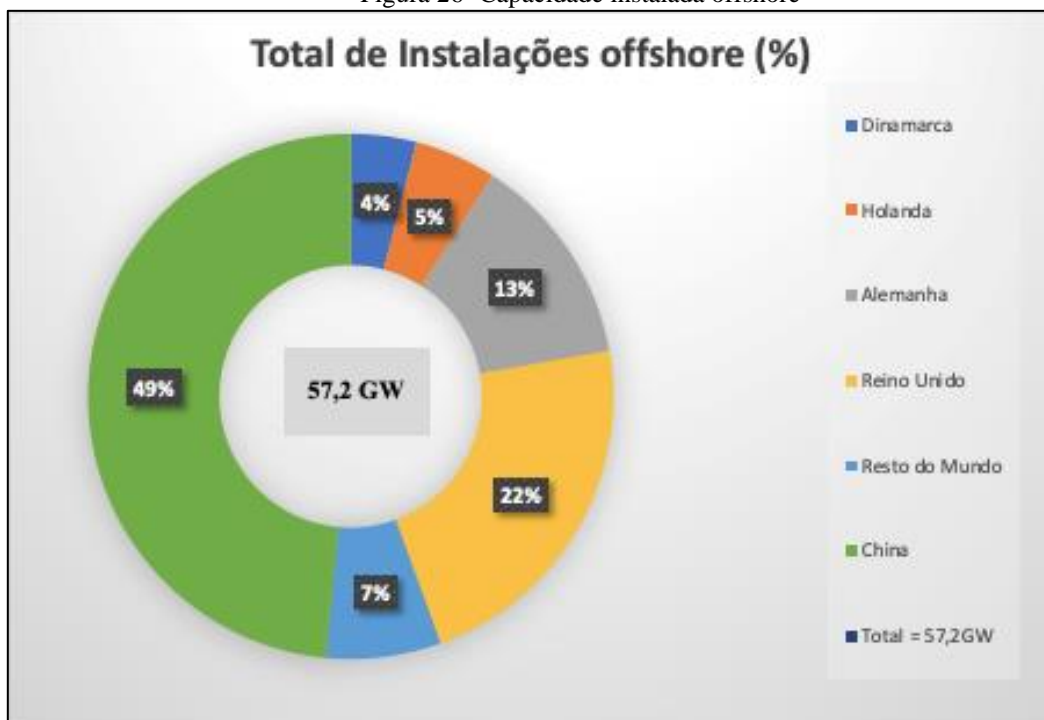
Em 2021, a capacidade instalada mundial *onshore* era de 780 GW. No que diz respeito à *offshore*, ela teve um grande aumento em 2021, chegando a 57,2 GW de potência. (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2022). As figuras 25 e 26 ilustram a distribuição da capacidade instalada *onshore* e *offshore* respectivamente por país.

Figura 25 - Capacidade instalada onshore



Fonte: do autor a partir de GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2022

Figura 26- Capacidade instalada offshore



Fonte: do autor a partir de GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2022

Desde 2010, o maior potencial eólico é o chinês, resultante da implementação das políticas do governo central. Para ilustrar, somente no ano de 2020 foram instalados 54 GW de potência eólica, recorde de instalação em um mesmo ano. No ano seguinte, em 2021, foram instalados 47,5 GW, das quais 16,9 GW são *offshore*, o que representa quase três vezes a instalação *offshore* global de 2020. A China representa, em relação a capacidade mundial, cerca de 40% do total de instalações *onshore* e 48% das instalações *offshore*. (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2022)

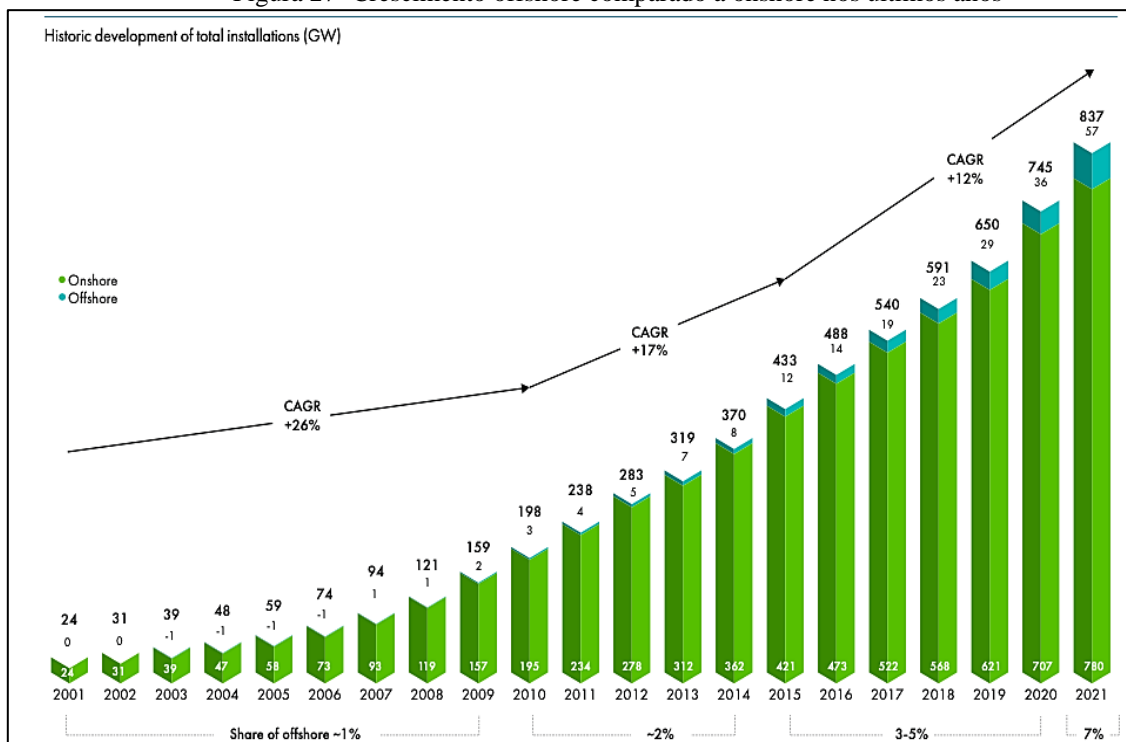
Os Estados Unidos é o segundo maior mercado eólico *onshore* no mundo, visto que, em 2021, eles representavam 17% do total de instalações. Já o Reino Unido fica em segundo lugar no mercado *offshore* com a representatividade de 22% do total das instalações.

### 2.3.1 Evolução de potencial mundial

É visível que se faz necessário uma mudança na matriz energética do planeta e, nos últimos anos, houve um aumento exponencial em fontes energéticas consideradas renováveis. Na figura 27, é possível analisar esse crescimento e perceber o quanto a *offshore* tem crescido nos últimos anos, uma tecnologia com alto potencial e pouco explorada na geração eólica.



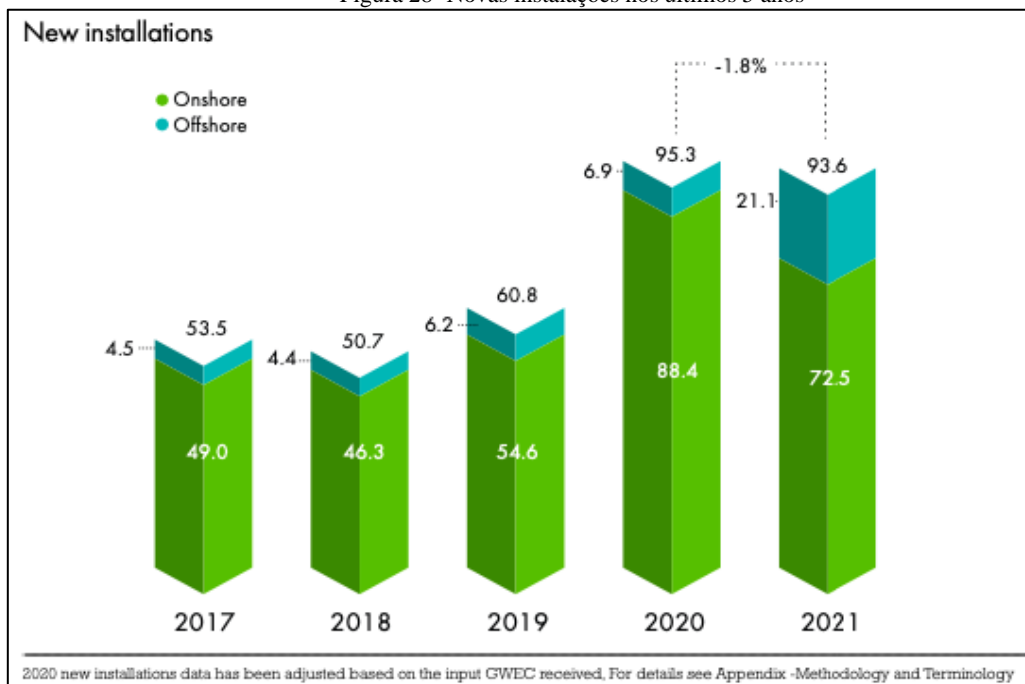
Figura 27- Crescimento offshore comparado a onshore nos últimos anos



Fonte: GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2022.

A energia eólica mundial não para de crescer. Em 2021, a capacidade mundial atingiu 837 GW, 12,4% a mais que no ano de 2020. Em 2021, foram adicionadas 93,6 GW de potência no mundo, sendo que 72,5 GW é *onshore* e 21,1 GW é *offshore*. Apesar de ser considerado uma grande evolução, esse número é 1,8% inferior à capacidade adicionada em 2020. Outro ponto que merece destaque são as novas instalações *offshore*, que, no ano de 2021, receberam um aumento significativo quando comparado aos anos anteriores. Vale destacar que a eólica *offshore* é uma tecnologia que está em alta: só em 2021, foi adicionada 21,1 GW de potência e, ao somar os dados de 2017 a 2020, há 22 GW de potência instalada. Na figura 28, elaborada pela GWEC, ilustra os dados mencionados acima. (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2022)

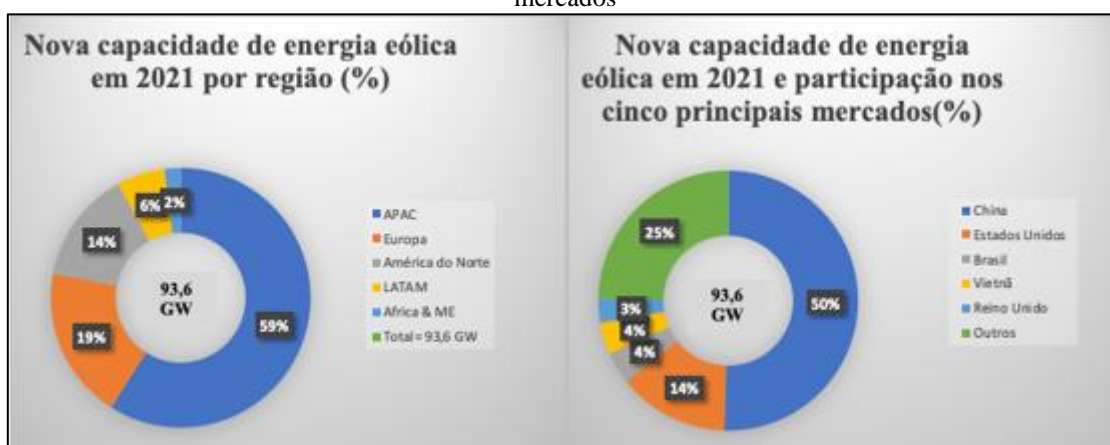
Figura 28- Novas instalações nos últimos 5 anos



Fonte: GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2022.

A Ásia é a região com maior evolução de energia eólica. Em 2021, a região da Ásia-Pacífico foi responsável por 59% das novas capacidades de energia eólica, seguida pela Europa, com 19%, impulsionada pelo recorde de instalações *onshore*. Por sua vez, os 5 mercados que tiveram os maiores crescimentos em energia eólica em 2021 foram China, Estados Unidos, Brasil, Vietnã e Reino Unido, representando 75% das instalações globais. (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2022)

Figura 29- Nova capacidade de energia eólica por região e participação nos cinco principais mercados



Fonte: do autor a partir de GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2022.

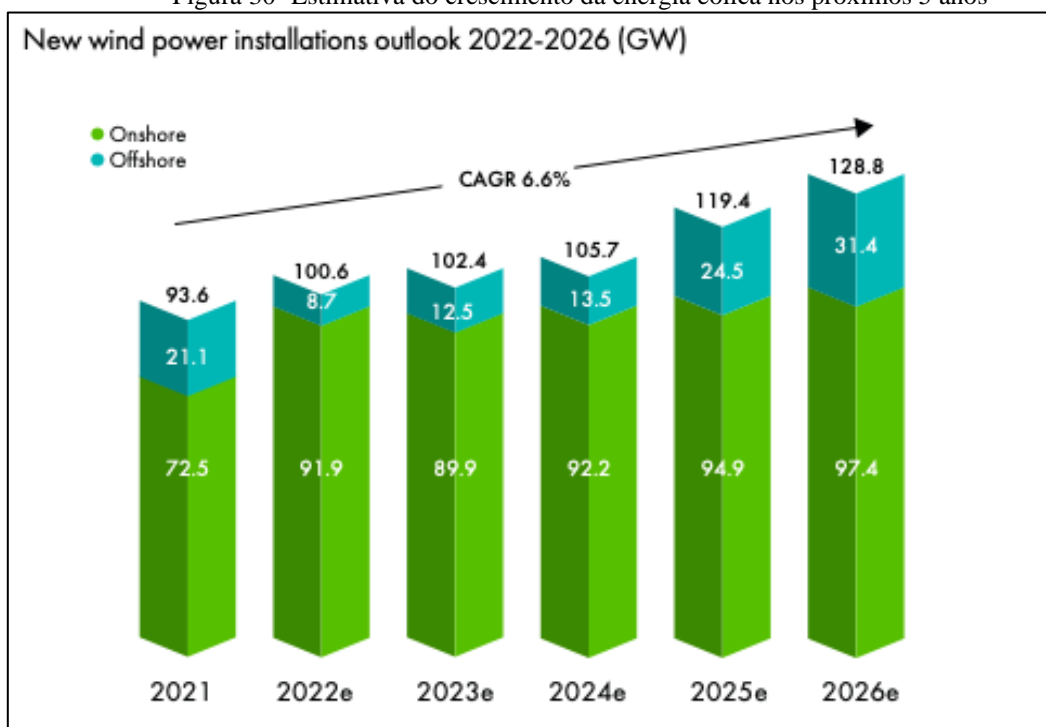
Uma das explicações do porquê a Ásia-Pacífico lidera o ranking de nova capacidade instalada é a quantidade de parques eólicos *offshore* instalados em 2021. A geração *offshore* teve um aumento de 209% de 2020 em relação a 2021 em relação a 2020, que ocorreu,

principalmente, pelas instalações orientadas por China e Vietnã. A China, país que liderou as instalações *offshore*, instalou 17 GW de nova capacidade. Países da Europa como Reino Unido, Holanda, Alemanha, Dinamarca e França também têm feito altos investimentos nas eólicas *offshore* e, por esse motivo, o mercado europeu está atrás apenas da China. Por outro lado, por enquanto os Estados Unidos é o único mercado *offshore* nas américas, mas, em 2021, nenhum projeto foi construído. (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2022)

### 2.3.2 Evolução mundial de 2022 a 2026

Estima-se que a energia eólica deve crescer cerca de 6,6% ao ano pelos próximos 5 anos, com uma capacidade adicionada de 557 GW. Em outras palavras, 110 GW serão adicionados à capacidade mundial por ano. Espera-se que sejam criadas 466 GW de instalações *onshore* até 2026 e que a *offshore* saia de 21,1 GW em 2021 para 31,4 GW em 2026. Ver figura 30.

Figura 30- Estimativa do crescimento da energia eólica nos próximos 5 anos

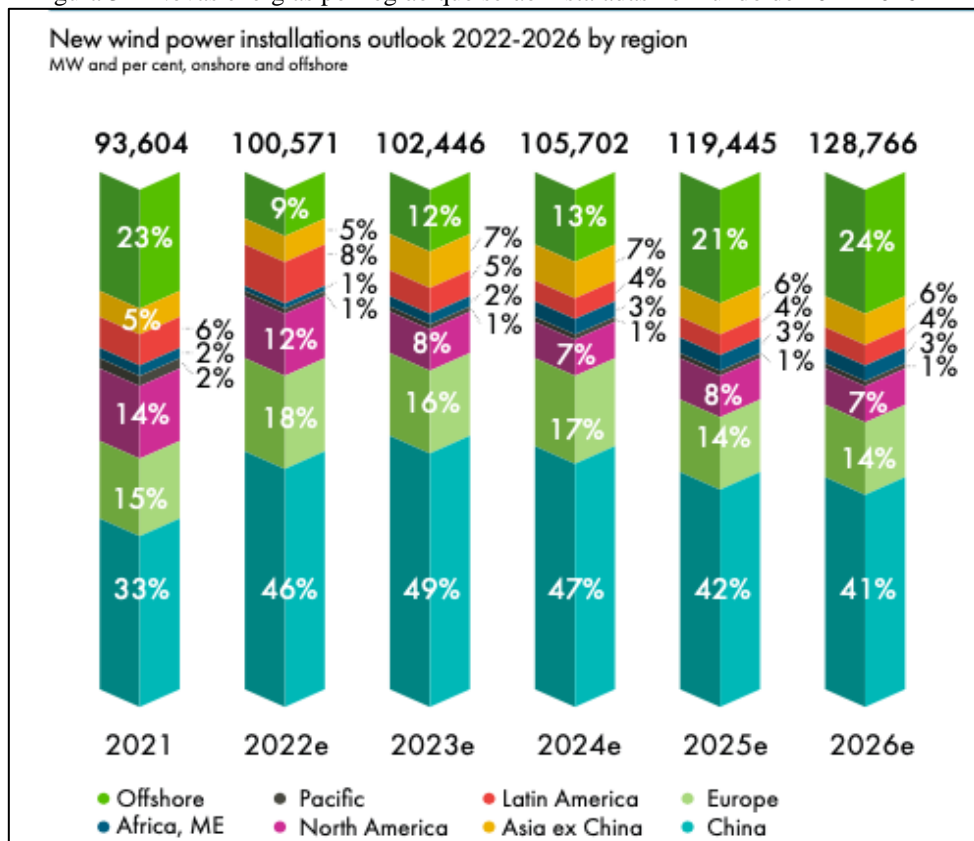


Fonte: GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2022.

A China continuará sendo a maior contribuidora, pois eles devem adicionar 39 GW nos próximos 5 anos. Outros países da Ásia também devem continuar adicionando à capacidade mundial, como Taiwan, com 6,6 GW. Além disso, estima-se que 28 GW de capacidade eólica *offshore* seja acrescentada na Europa de 2022 a 2026, sendo que 41% dessa capacidade será proveniente do Reino Unido. Nos Estados Unidos,

a estimativa é que 11,5 GW da capacidade *offshore* seja construída nos próximos 5 anos (2022 - 2026), o que colocará o país em terceira posição no ranking de capacidade *offshore*. (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2022)

Figura 31- Novas energias por região que serão instaladas no mundo de 2022-2026



Fonte: GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2022.

A imagem acima, feita pela GWEC, ilustra os dados de novas energias por região que serão instaladas no mundo de 2022-2026.

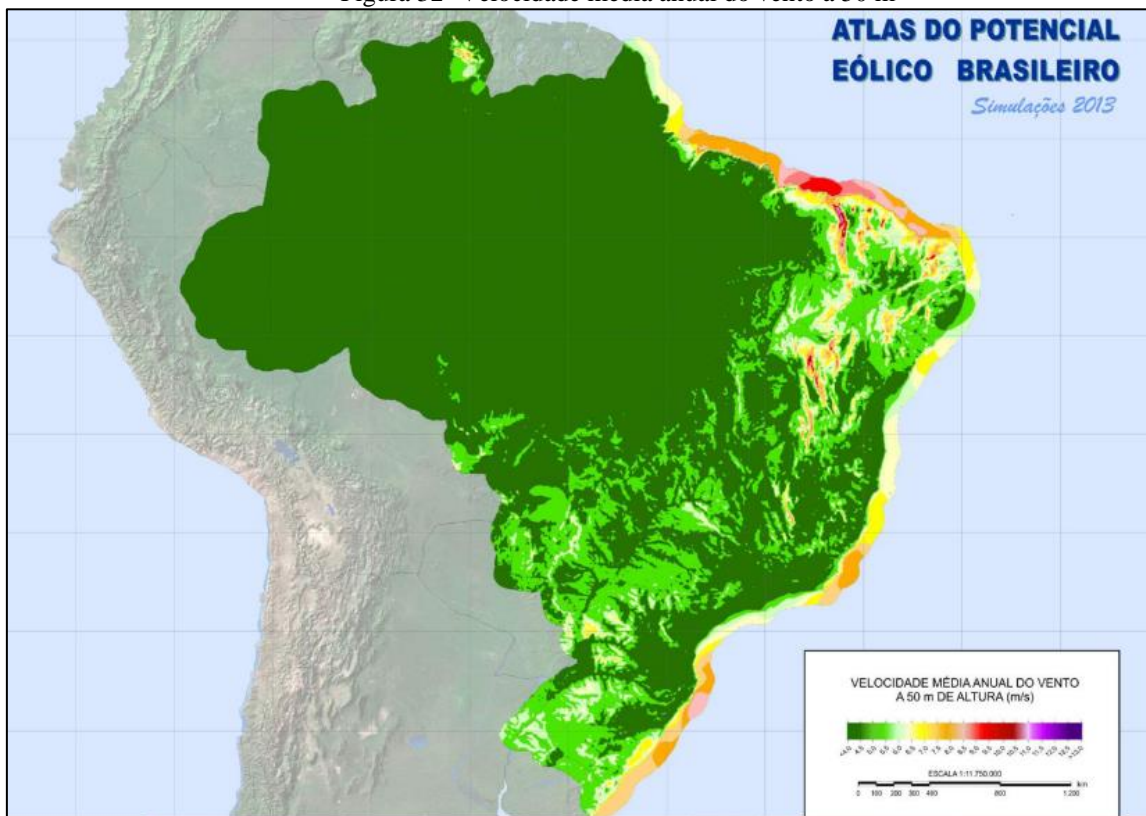
## 2.4 Energia Eólica no Brasil

Em 1992, no arquipélago de Fernando de Noronha, entrou em operação o primeiro aerogerador instalado no Brasil, resultado de uma parceria entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), com financiamento do instituto de pesquisas dinamarquês Folkecenter. Durante os dez anos seguintes, a energia eólica pouco cresceu, em parte pela falta de políticas, mas principalmente pelo alto custo da tecnologia. Durante a crise energética de 2001, houve a tentativa de incentivar a contratação de empreendimentos de geração de energia eólica no país. Criou-se então, o Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA). Esse programa tinha como objetivo a contratação de 1.050 MW de projetos de energia eólica

até dezembro de 2003. Já se falava, então, da complementaridade sazonal do regime de ventos com os fluxos hidrológicos nos reservatórios hidrelétricos. Esse programa, no entanto, não obteve resultados e foi substituído pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, o PROINFA. Além de incentivar o desenvolvimento das fontes renováveis na matriz energética, o PROINFA abriu caminho para a fixação da indústria de componentes e turbinas eólicas no Brasil com exigências de conteúdo nacional para os aerogeradores fruto desse programa (ABEEólica, 2022).

No Brasil, o interesse foi manifestado de modo efetivo a partir da divulgação do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, que foi desenvolvido a partir do uso da ferramenta Mesomap, que simula a dinâmica dos ventos para as condições geográficas existentes, publicado em 2001 pela ANEEL, e, de modo comercial, a partir da criação do PROINFA e da realização dos leilões para a fonte eólica. Em 2013 tivemos a atualização do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro conforme figura 32.

Figura 32- Velocidade média anual do vento a 50 m



Fonte: Atlas do Potencial Eólico do Brasil, 2013.

O Atlas Brasileiro visa capacitar os gestores quanto a tomada de decisão na identificação do potencial eólico para melhor aproveitamento na geração de energia.

Dessa maneira, fica claro, em ordem crescente, que os maiores potenciais eólicos no país estão na região Sul, Sudeste e Nordeste.

O Brasil é favorecido em termos de ventos, que se caracterizam por uma presença duas vezes superior à média mundial e pela volatilidade de 5% (oscilação da velocidade), o que dá maior previsibilidade ao volume a ser produzido. Além disso, como a velocidade costuma ser maior em períodos de estiagem, é possível operar as usinas eólicas em sistema complementar com as usinas hidrelétricas, de forma a preservar a água dos reservatórios em períodos de poucas chuvas. Sua operação permitiria, portanto, a “estocagem” da energia elétrica (ANEEL, 2008).

#### **2.4.1 Potencial Brasileiro**

O Brasil tem um grande potencial eólico devido a ótima qualidade do seu vento. Segundo as estimativas da ABEEólica (2022), o Brasil tem um potencial em terra de mais de 500 GW. Em um futuro próximo, o país em questão ainda tem espaço para continuar crescendo, visto que nos próximos anos a geração eólica deve aumentar em 50%. No entanto, esses números são considerados conservadores, pois a geração eólica tem custos considerados competitivos, o que pode gerar novos investimentos.

A definição em 2022 de uma regulamentação doméstica envolvendo os parques eólicos *offshore* deverá dar impulso adicional ao setor, em um contexto no qual ainda há um espaço expressivo para que o Brasil explore todo o potencial disponível de geração eólica (*onshore e offshore*). No caso da produção *onshore*, a ABEEólica estima um potencial de mais de 500 GW de capacidade de geração (ou seja, aproximadamente 25x o parque instalado atual). No caso da produção *offshore*, estudo recente do Banco Mundial sugere um potencial de pouco mais de 1200 GW. (BORGES, 2022).

O potencial brasileiro deve aumentar ainda mais com a chegada das eólicas *offshore*. Apesar dessa tecnologia ainda não estar presente no país, o processo de regulamentação já está em desenvolvimento.

Em janeiro de 2022, o governo publicou o Decreto nº 10.946, que dispõe sobre a cessão de uso de espaços físicos e o aproveitamento dos recursos naturais no mar para a geração de energia elétrica a partir de empreendimentos *offshore*. Este decreto está sendo regulamentado. Também está em tramitação no Congresso o PL No 576/2021. (ABEEólica, 2022)

A costa brasileira tem um potencial de cerca de 700 GW, em locais com profundidade de até 50m. Todo esse potencial, é considerado infinito, devido a necessidade de ter uma matriz energética diversificada, não será necessário o uso de todo

esse potencial vindo dos ventos marítimos. Atualmente, mais de 60 projetos de eólicas *offshore* estão sendo analisados pelo IBAMA, que significa um total de mais de 160 GW de potência eólica na costa do país. Os projetos em análise são nos estados de Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. (ABEEÓLICA, 2022)

As eólicas *offshore* podem trazer outros benefícios, pois ela está ligada a uma indústria que será fundamental no futuro: a de hidrogênio. O hidrogênio é o elemento mais simples do universo. Além do mais, ele pode ser isolado e utilizado como combustível, tem um potencial energético maior que o óleo diesel e a gasolina, e, por não haver gás carbônico e monóxido de carbono durante sua queima, apenas a formação de água, o processo é totalmente limpo. O hidrogênio verde é produzido através de energias renováveis, sendo que a sua produção não emite carbono e, por essa razão, é considerado um combustível essencial para o futuro. Alguns estados do Brasil já estão cooperando para permitir a produção do hidrogênio verde no futuro, utilizando, principalmente, a eólica *offshore*, que geralmente englobam projetos de grandes dimensões.

A abundância de vento de qualidade no Brasil potencializa a produção *onshore* e *offshore* aumentando a oportunidade para produção de hidrogênio verde no país. O Brasil será um importante player global. Considerando que os custos de energia correspondem a aproximadamente 70% dos custos totais de produção do hidrogênio verde, o Brasil terá o menor custo de hidrogênio verde produzido a partir da fonte eólica em 2030 quando comparado com outros países no mundo, devido à abundância e baixos custos atrelados a esta fonte no país. Mais de 200 bilhões de dólares de investimento mapeados atualmente em projetos já anunciados ou memorandos (MoUs) assinados. A primeira fábrica de hidrogênio verde no Brasil já está em construção no polo industrial de Camaçari e deve entrar em operação comercial em 2023. (ABEEólica, 2022c)

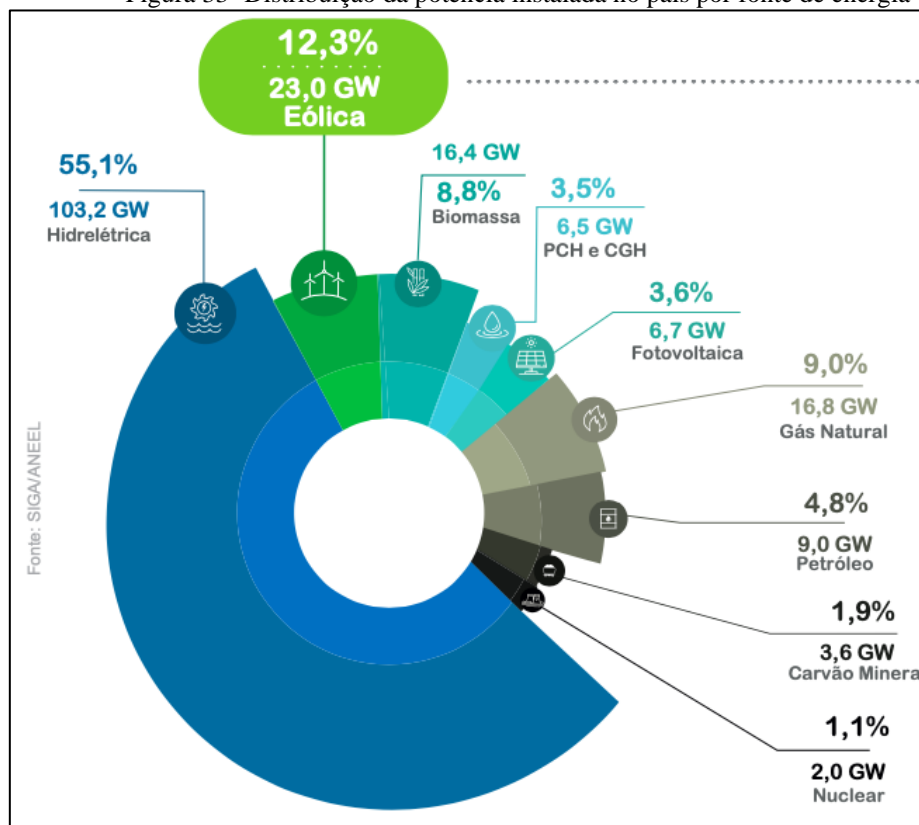
O hidrogênio verde apresenta algumas vantagens: segurança energética, armazenamento, adaptabilidade, redução da variação de preço, produção e transporte do combustível. Segundo IRENA, diversos países estão montando planos para produção de hidrogênio por meio das fontes renováveis. Os principais países da Europa e Ásia já definiram as estratégias para produção de Hidrogênio Verde. Dessa forma, evidencia-se que essa nova fonte de energia pode impulsionar ainda mais a instalação de novos parques de energia renovável, tornando-as cada vez mais fortes e competitivas. (Irena, 2021 apud ABEEÓLICA, novo)

## 2.4.2 Capacidade Instalada no Brasil

Segundo a ABEEólica (2022), o Brasil tem uma capacidade instalada de 23,34 GW de energia eólica. Ademais, esse tipo de energia está presente em 12 estados e o país tem um total de 850 parques eólicos, com mais de 9598 aerogeradores em operação. Atualmente, apesar de ainda não contar com eólicas *offshore*, a indústria eólica brasileira ocupa o sexto lugar no *ranking* global de capacidade instalada *onshore*. (ABEEÓLICA, 2022b)

A figura 33 a seguir, ilustra a distribuição da potência instalada no país por fonte de energia. A geração eólica fica em segundo lugar, com 12,3% da capacidade instalada.

Figura 33- Distribuição da potência instalada no país por fonte de energia



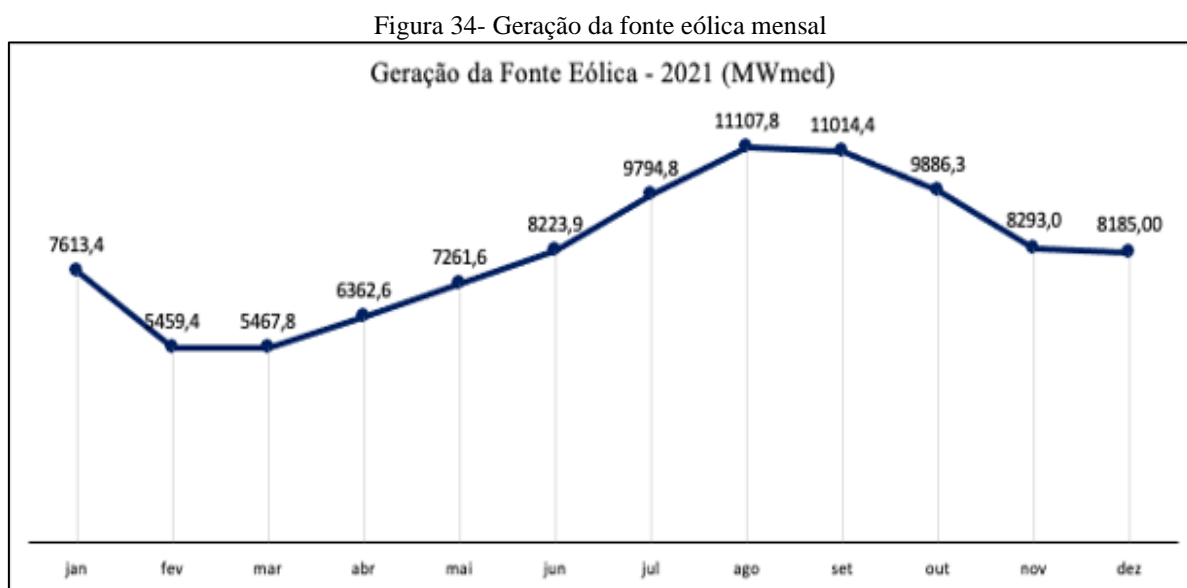
Fonte: ABEEólica, 2022.

A capacidade instalada cresceu cerca de 1,29% em relação ao ano de 2020, o que significa que cerca de 36,2 milhões de residências podem ser abastecidas por meio da energia eólica. Estima-se, também, que 108 milhões de habitantes são beneficiados de alguma forma em momentos de pico, conhecidos como a "safra dos ventos". (ABEEÓLICA, 2022a; ABEEÓLICA, 2022b)



### 2.4.3 Geração de energia por Região e Estado

A Geração de energia por meio da fonte eólica em 2021, foi, em média, 8.222,5 MWmed gerados, somando um total de 72,20 GWh. Na figura 34, é possível observar a geração de cada mês. Entre eles, agosto e setembro se destacam, fase em que se inicia a safra dos ventos, fenômeno que se inicia na segunda metade do ano e vai até o mês de novembro. (ABEEÓLICA, 2021)



Fonte: do autor a partir de ABEEÓLICA, 2021.

No que diz respeito ao Brasil, pode-se dizer que o Nordeste é a região que tem o maior potencial eólico do país, visto que 80% dos parques eólicos brasileiros estão localizados nesse local. Isso acontece porque a região em questão tem um dos melhores ventos não apenas do Brasil, mas do mundo todo.

Figura 35- Geração e representatividade por região nos anos 2020 e 2021

Região	2020		2021		% de crescimento
	Geração (TWh)	Representatividade	Geração (TWh)	Representatividade	
Sudeste	0,05	0,1%	0,06	0,1%	4%
Sul	6,33	11,5%	6,20	8,7%	-2%
Nordeste	47,00	85,6%	63,20	88,7%	34%
Norte	1,50	2,7%	1,76	2,5%	17%
Total	54,89	100%	71,22	100%	29,7%

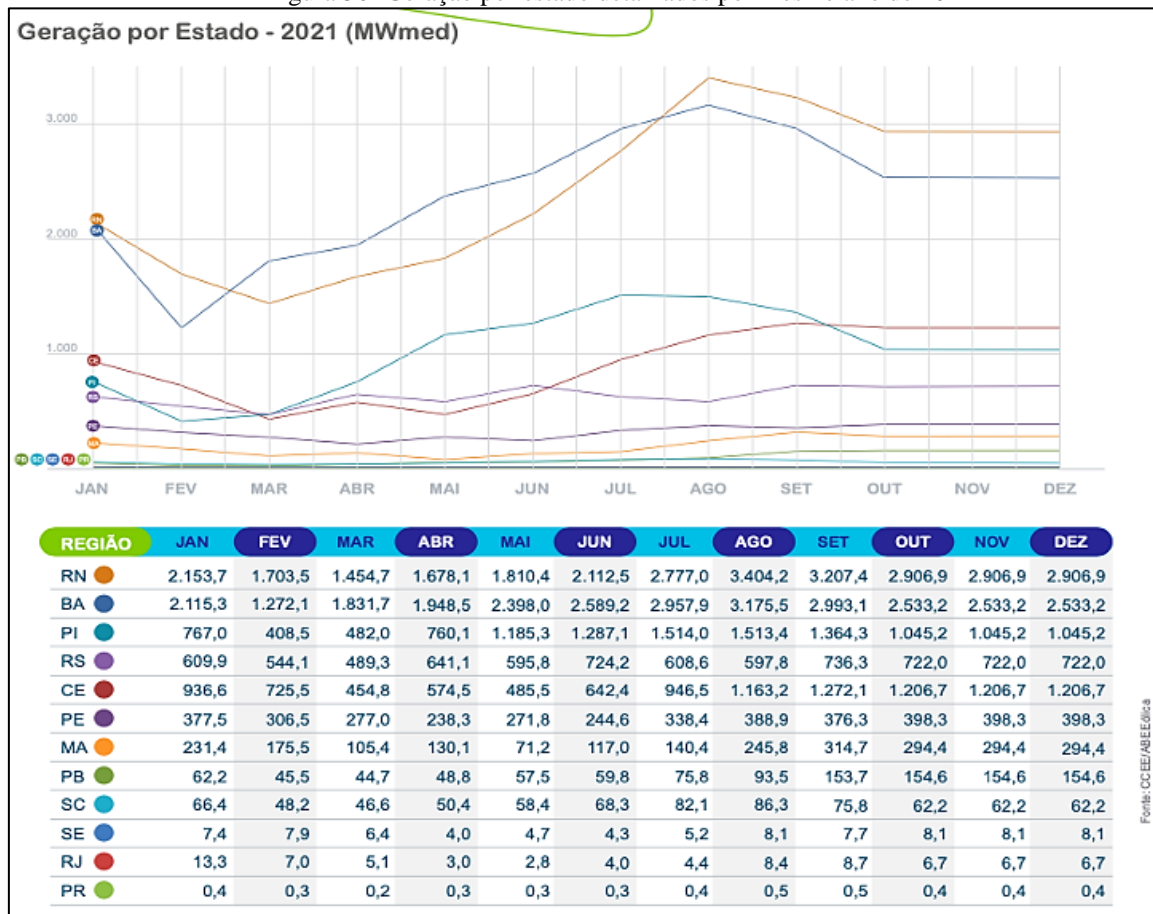
Fonte: do autor a partir de ABEEÓLICA, 2021.

A figura anterior demonstra que o Nordeste sozinho produziu 63,20 TWh, valor que representa 88,7% da energia eólica total gerada no país. A região sul aparece em seguida com uma produção de 6,20 TWh, que representa apenas 8,7% da geração brasileira. Por sua vez, as regiões Norte e Sudeste, apesar de terem representatividade

modesta na produção de energia eólica, apresentaram um crescimento de 17% e 4%, respectivamente, em comparação ao ano de 2020. (ABEEÓLICA, 2021)

Após a análise feita sobre as regiões brasileiras, é válido abordar a capacidade dos estados do país. Na figura 36, vemos a geração por estado.

Figura 36- Geração por estado detalhados por mês no ano de 2021



Fonte: ABEEÓlica, 2021.

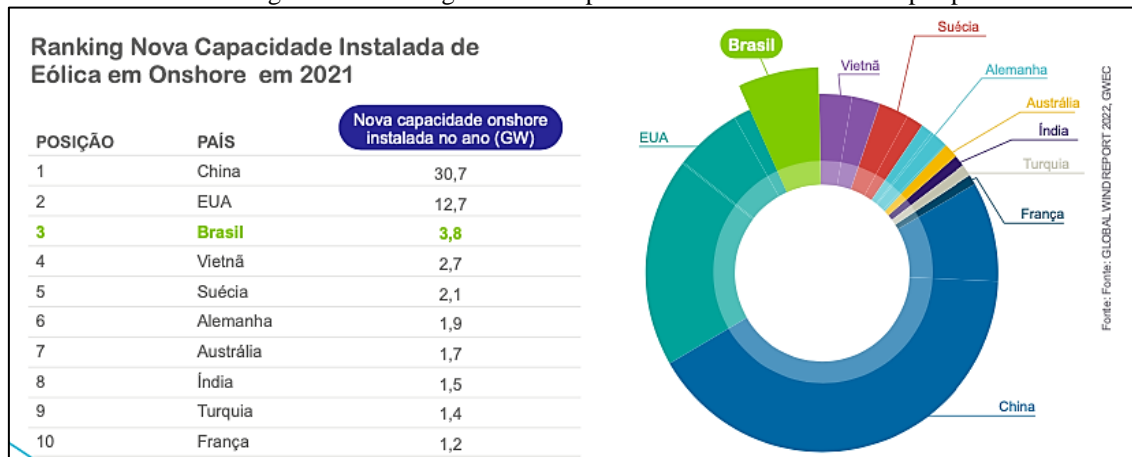
Em 2021, os 4 estados que mais se destacaram foram: Rio Grande do Norte, que gerou 21,23 TWh; Bahia, com uma produção de 21,15 TWh; Piauí, com 9,10 TWh produzidas; e o Ceará, com 7,91 TWh. Todos os estados citados anteriormente fazem parte do nordeste, a região brasileira mais forte em eólicas. Todavia, o Rio Grande do Sul aparece como o primeiro estado de destaque que não faz parte da região nordeste, com uma geração de 5,63 TWh. (ABEEÓLICA, 2021)

#### 2.4.4 Evolução da capacidade instalada

Segundo dados do Global Wind Energy Council, o Brasil ocupava o 15º lugar em capacidade instalada de energia eólica em 2012. Todavia, a partir de 2020, o Brasil passou

a ocupar o 6º lugar no Ranking Mundial *onshore*. A figura abaixo ilustra o ranking de novas capacidades instaladas em 2021 por país.

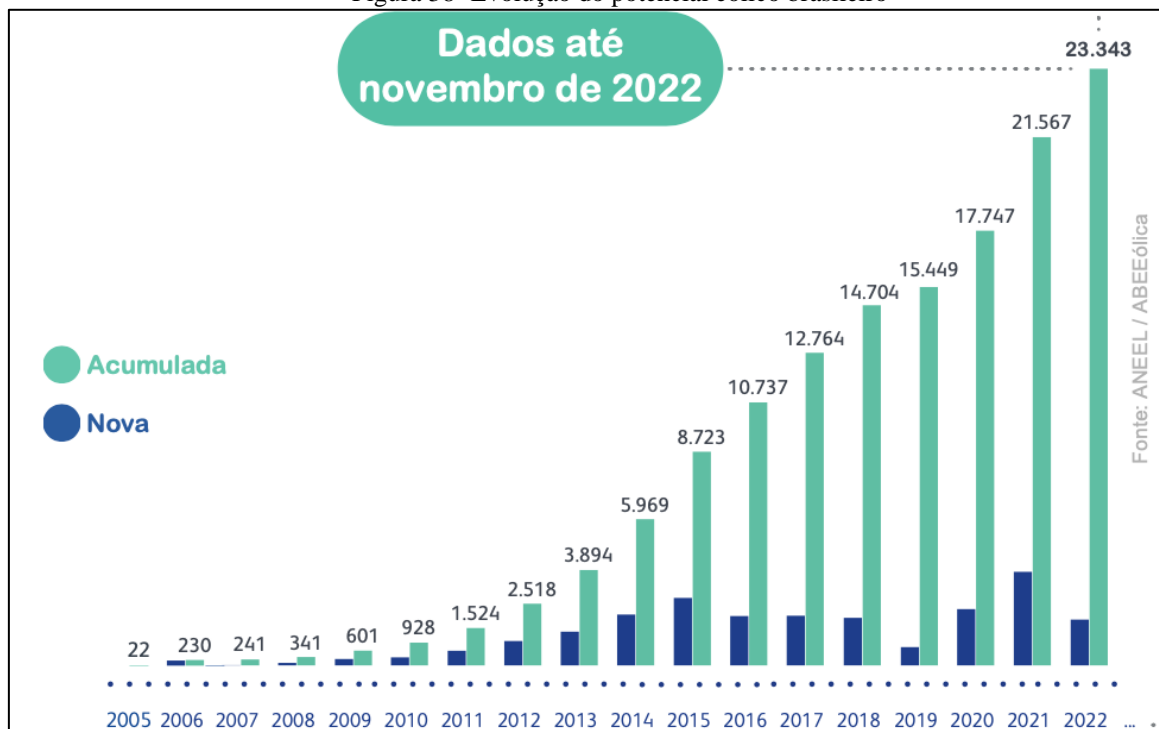
Figura 37- Ranking de novas capacidades instaladas em 2021 por país



Fonte: ABEEólica, 2021.

Quando se trata do ranking de novas capacidades instaladas, o Brasil se encontra na terceira posição pelo segundo ano consecutivo, ficando atrás apenas da China e dos Estados Unidos nos anos de 2020 e 2021. (ABEEÓLICA, 2021)

Figura 38- Evolução do potencial eólico brasileiro



Fonte: ANEEL/ABEEólica, 2022.

Na figura acima, é visível que o potencial eólico brasileiro sofreu uma evolução expressiva: o país passou de 22 GW em 2005 para um total de 23.343 GW de energia

eólica instalada em 2022. Isso indica um crescimento de potencial médio de aproximadamente 1.372 GW por ano. (ABEEÓLICA, 2021)

A ABEEólica (2021) apresentou os dados sobre a evolução da energia eólica brasileira em 2021. O ano de 2021 bateu o recorde de instalações de novas capacidades: no total foram instalados 110 parques eólicos (1 parque foi revogado), gerando uma nova capacidade de 3,83 GW no total (10 MW de capacidade foram revogados).

Considerando todas as fontes de geração de energia elétrica, em 2021, foram instalados 7,5 GW de potência e a eólica foi a fonte que mais cresceu, representando 50,91% da nova capacidade instalada no ano. A segunda fonte que mais cresceu foi a solar fotovoltaica, com 17,95% da nova capacidade. (ABEEólica, 2021)

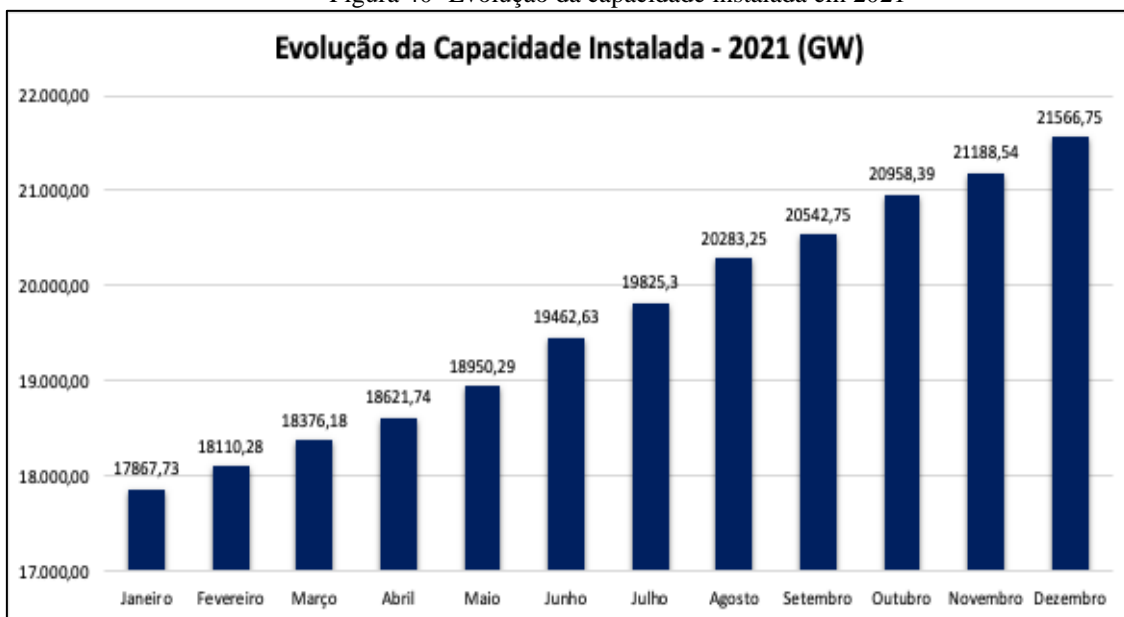
Figura 39- Ranking da criação de novos parques no Brasil em 2021

<b>Estados com novos parques em 2021</b>		
	Soma de Potência (MW)	Número de Parques
RN	1690,99	42
BA	1073,40	33
PB	471,24	15
PI	281,40	8
CE	210,00	9
PE	99,00	2
SC	4,20	1
<b>Total Geral</b>	<b>3830,2</b>	<b>110</b>

Fonte: do autor a partir de ABEEÓLICA, 2021.

Segundo a figura apresentada acima pela Associação Brasileira de Energia Eólica no boletim de 2021, podemos ver que o Rio Grande do Norte apresentou a maior evolução, com a construção de 42 novos parques e com uma potência de 1690,99 MW. A Bahia vem em segundo lugar, contando com 33 novos parques eólicos e 1.073,40 MW de potência instalada. Outros estados que tiveram destaque foram Paraíba, Piauí, Ceará, Pernambuco e Santa Catarina, com 35 novos parques eólicos somados e uma potência instalada total de 1.065,84 MW. (ABEEÓLICA, 2021)

Figura 40- Evolução da capacidade instalada em 2021



Fonte: do autor a partir de ABEEÓLICA, 2021.

Na figura 40 sobre a evolução da capacidade instalada em 2021, verifica-se que o Brasil tinha 17.867,73 GW instalado em janeiro, mas terminou o ano com 21.566,75 GW instalado. Desse total, 21,13 GW eram utilizados para operação comercial e 0,44 GW estavam sendo utilizados para operação de teste.

Ao comparar o ano de 2021 com até novembro de 2022, é possível verificar a continuidade da evolução eólica nas regiões brasileiras, principalmente no Nordeste. Isso se justifica porque os principais parques eólicos brasileiros se encontram nesse local e no sistema interligado nacional. Em 2021, 104,70% da energia consumida pelo subsistema da região Nordeste veio das eólicas, com geração de 11,907 MWmed. Na região Sul, 16,96% da energia consumida pelo subsistema veio das eólicas, com 1,796 MWmed. A região Norte conta com 6,70% da energia consumida pelo subsistema vindo das eólicas, com uma geração de 413 MWmed. O sistema interligado nacional consumiu 20,05% da energia eólica e teve a geração de 13.264 MWmed. A região Sudeste tem uma representatividade muito pequena na geração eólica em 2021 teve uma geração de 0,06 TWh, isso representa 0,1% do país. (ABEEÓLICA, 2021)

No que diz respeito ao ano de 2022 nos dados apresentado pelo infoVento27, 137,02% da energia consumida pelo subsistema da região Nordeste adveio das eólicas, apresentando um fator de capacidade de 72,85% e geração de 14,439 MWmed. A região Sul se manteve estável com os mesmos 16,96% da energia consumida pelo subsistema vindo de eólicas e a região apresentou um fator de capacidade de 86,63% com 1.796

MWmed. A região Norte do país conta com os mesmos 6,70% da energia consumida pelo subsistema vindo das eólicas, com fator de capacidade de 96,96% e sua geração é de 413 MWmed. O sistema interligado nacional consumiu 22,97% da energia eólica, e teve um fator de capacidade de 72,85%, com uma geração de 15.890 MWmed. (ABEEÓLICA, 2022a)

#### **2.4.5 Transição Energética**

O processo de transição energética está progredindo mundialmente, pois

Na última década, a capacidade das energias renováveis aumentou 130%, enquanto as não renováveis cresceram apenas 24% (...). Em 2021, a capacidade total instalada de eletricidade renovável atingiu 3 064 GW, gerando cerca de 8.000 terawatts-hora (TWh) de eletricidade. No entanto, 2021 viu uma desaceleração geral nas adições de capacidade, embora as energias renováveis tenham se saído melhor do que as não renováveis. (IRENA, 2022, p.42, tradução nossa)

É válido mencionar que entre todas as energias renováveis, a solar é a que teve o crescimento mais expressivo. No entanto, apesar de não ter tido um crescimento tão significativo quanto esta, a energia eólica também cresceu ao redor do mundo.

No que diz respeito aos investimentos para a transição energética, eles também estão aumentando. Isso se justifica porque, em 2022, \$ 1 Trilhão de investimentos foram destinados à essa área, representando um aumento de 21% em relação a 2020 (BNEF, 2022b; IEA, 2021c apud IRENA, 2022).

No caso do Brasil, é simples falar sobre transição energética, pois a matriz elétrica e energética apresenta uma participação em renováveis maior que a mundial. 83% da matriz elétrica brasileira é considerada renováveis, enquanto a média mundial é de cerca de 25%. Enquanto a matriz energética tem 46%, e a média mundial é de cerca de 15%. (ABEEólica, 2022d)

O Brasil, no futuro, será ainda mais renovável: o país possui ventos de ótima qualidade, alto potencial solar e biomassa com crescimento sólido. Entretanto, o desafio do país é gerenciar e tirar o máximo de cada uma das fontes, trazendo retornos econômicos, sociais e ambientais. Por ter essa abundância, podemos alcançar a transformação energética, é possível entendendo o significado da transição. O conceito de transformação envolve um crescimento muito mais amplo, complexo e precisa

impactar de forma positiva todas as áreas, gerando impacto econômico e social e investimentos de forma responsável nos recursos naturais. (ABEEólica, 2022d)

#### **2.4.6 Sistema Interligado Nacional (SIN)**

O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte.

A interconexão dos sistemas elétricos, por meio da malha de transmissão, propicia a transferência de energia entre subsistemas, permite a obtenção de ganhos sinérgicos e explora a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias. A integração dos recursos de geração e transmissão permite o atendimento ao mercado com segurança e economicidade.

A capacidade instalada de geração do SIN é composta, principalmente, por usinas hidrelétricas distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país. Nos últimos anos, a instalação de usinas eólicas, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, apresentou um forte crescimento, aumentando a importância dessa geração para o atendimento do mercado. As usinas térmicas, em geral localizadas nas proximidades dos principais centros de carga, desempenham papel estratégico relevante, pois contribuem para a segurança do SIN. Essas usinas são despachadas em função das condições hidrológicas vigentes, permitindo a gestão dos estoques de água armazenada nos reservatórios das usinas hidrelétricas, para assegurar o atendimento futuro. Os sistemas de transmissão integram as diferentes fontes de produção de energia e possibilitam o suprimento do mercado consumidor.

#### **2.4.7 Leilão**

De acordo com o Governo Federal, o leilão de energia elétrica é uma concorrência realizada pelo poder público para obter energia elétrica em um prazo futuro, pré-determinado nos termos de um edital. Os leilões são importantes para equilibrar a oferta e consumo de energia. A realização de leilões de compra de energia elétrica, especialmente os de novos empreendimentos de geração, são ainda as bases para a expansão do sistema elétrico brasileiro.

Os leilões são divididos de acordo com o tipo de empreendimento: se novo ou existente. Os leilões de “energia nova” destinam-se à contratação de energia de usinas em projeto ou em construção, que poderão fornecer energia em 3 (A-3) ou 5 (A-5) anos a partir da contratação. A diferença para a chamada “energia velha”, são os investimentos para a sua construção e entrada em operação, que ainda não foram amortizados (pagos) e, por essa razão, tornam a energia nova mais cara que a energia velha.

As primeiras contratações de empreendimentos eólicos de grande porte no Brasil se deram por meio do PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, instituído em 2002 com o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimento a partir das fontes eólica, biomassa e de pequenas centrais hidrelétricas. Esse programa resultou na contratação de 1.304 MW de projetos eólicos.

Nos leilões de energia, cabe à EPE a habilitação técnica dos projetos candidatos, cujos dados e características técnicas são apresentados pelos empreendedores e analisados previamente a cada certame.

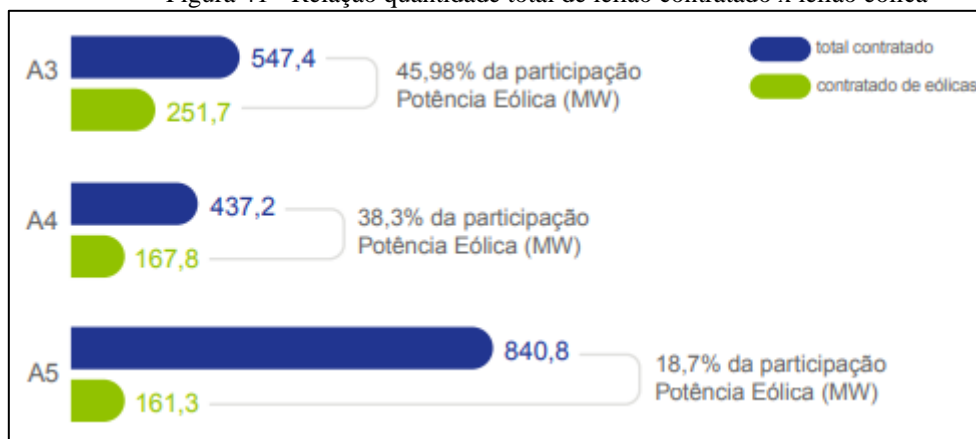
Após a promulgação do novo marco do setor elétrico (Lei nº 10.848 de março de 2004) foi estabelecida a contratação de energia por meio de leilões de energia, tendo a fonte eólica participado pela primeira vez no Leilão de Fontes Alternativas de 2007, porém sem comercialização de energia, fato que só ocorreria dois anos depois no Leilão de Reserva de 2009.

De forma a acompanhar o amadurecimento da fonte e seu desenvolvimento tecnológico, os requisitos técnicos exigidos pela EPE evoluíram ao longo do tempo. As medições anemométricas, por exemplo, antes dispensadas, hoje devem contar com no mínimo 3 anos de registros de velocidade e direção do vento, para diminuir a incerteza sobre o recurso e a geração futura.

Em 2021, foram contratados 580 MW de capacidade instalada em três leilões. Veja, na figura 41, a quantidade total contratada por leilão e quanto pertenceu a eólica.



Figura 41 - Relação quantidade total de leilão contratado x leilão eólica



Fonte: ABEEólica, 2022.

A ABEEólica afirma que também tivemos um bom ano no mercado livre, embora os números dessas operações não sejam centralizados em nenhum banco de dados enquanto as operações não se tornam públicas, estimamos que, de uma forma geral, as empresas de energia eólica venderam cerca de 3 GW de capacidade instalada para o mercado livre em 2021. Pelo quarto ano consecutivo, a fonte eólica vendeu mais no mercado livre do que no mercado regulado.

#### 2.4.8 Certificado de Energia Renovável

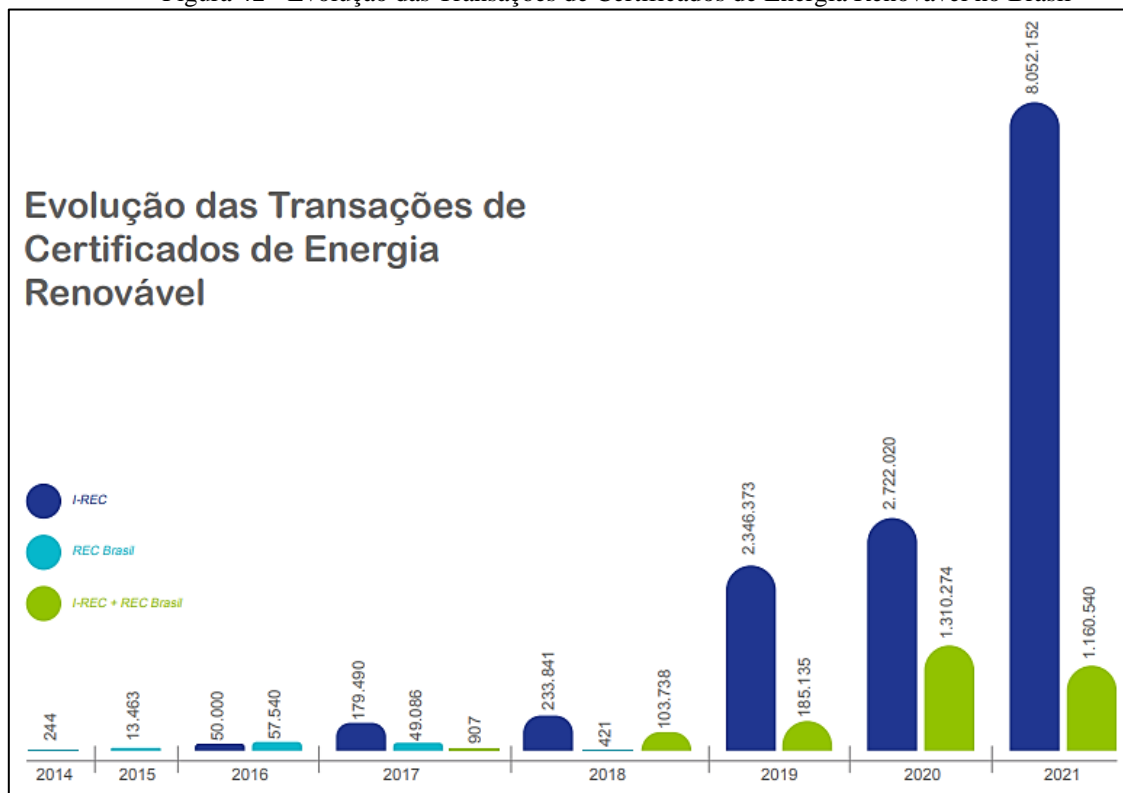
Segundo o Instituto Totum, o Programa de Certificação de Energia Renovável foi lançado há sete anos no Brasil e tem registrado números de crescimento consistentes nos últimos anos. O Programa de Certificação de Energia Renovável “REC Brazil” é uma iniciativa conjunta da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) e da Associação Brasileira de Geração de Energia Limpa (Abragel), com apoio da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), da Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia (ABRACEEL) e da Associação Brasileira do Biogás e do Biometano (ABIOGÁS), e visa fomentar o mercado de energia gerada a partir de fontes renováveis e com alto desempenho em termos de sustentabilidade..

Dentro do programa, o Instituto Totum certifica geradores de energia renovável dentro dos critérios do I-REC e geradores de energia renovável com critérios adicionais de sustentabilidade com a chancela adicional REC Brazil. O Instituto Totum é responsável também pela emissão dos RECs (Certificados de Energia Renovável).

O ano de 2021 trouxe boas notícias sobre os Certificados de Energia Renovável: o mercado de I-RECs está crescendo, o Brasil está se destacando no mercado global e as

perspectivas de futuro são as melhores possíveis. O número de usinas brasileiras com Certificados de Energia Renovável é cada vez maior. No final de 2020, eram 148 usinas registradas e finalizamos 2021 com 266 usinas. Isso faz com que o Brasil ocupe hoje a liderança na plataforma I-REC, o International REC Standard (I-REC), sistema global que possibilita o comércio de certificados de energia renovável, em termos de usinas registradas. Também podemos avaliar o ano olhando para os números de emissões de certificado renovável. Em 2020 emitimos pouco mais de 4 milhões de certificados. Em 2021, esse número foi de 9,2 milhões, tornando o Brasil o segundo mercado mundial de I-RECs, somente atrás da China em termos de emissões, como podemos observar na figura 42. Quanto à fonte eólica, esta respondeu por cerca de metade dos I-RECs emitidos no Brasil.

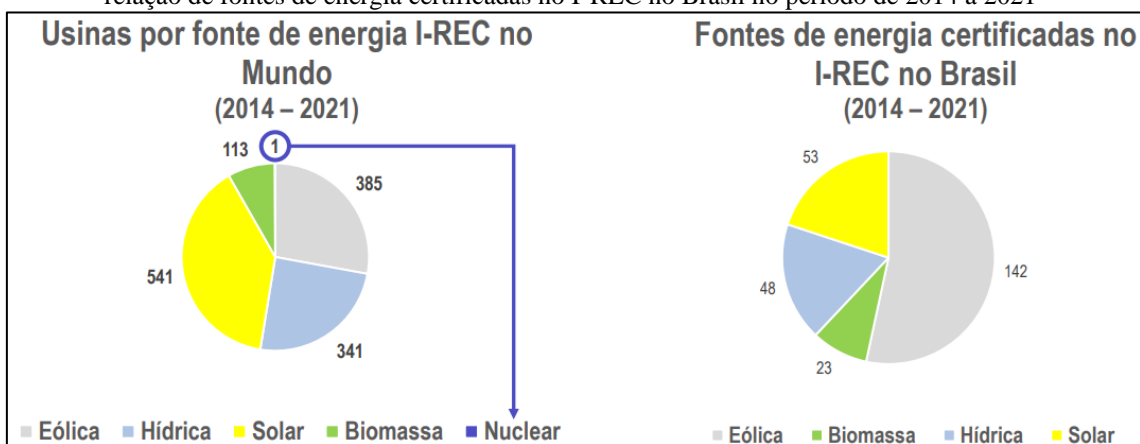
Figura 42 - Evolução das Transações de Certificados de Energia Renovável no Brasil



Fonte: ABEEólica, 2022

Vemos na figura 43, a demonstração da quantidade de usinas por fonte de energia I-REC no mundo e a relação de fontes de energia certificadas no I-REC no Brasil no período de 2014 a 2021. Tivemos cerca de 1381 usinas certificadas no mundo, enquanto no Brasil foram 266, representando o total de 19,26%, mostrando-se otimista para o futuro.

Figura 43 - Demonstração da quantidade de usinas por fonte de energia I-REC no mundo e a relação de fontes de energia certificadas no I-REC no Brasil no período de 2014 a 2021



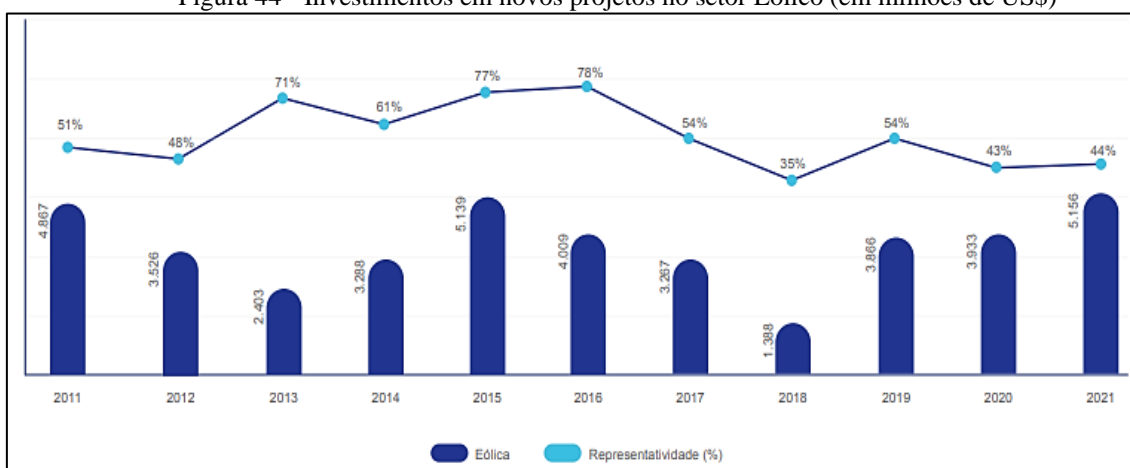
Fonte: Instituto Totum.

## 2.5 Impactos e contribuições econômicas

De acordo com Borges (2022), nos anos de 2011 a 2020, as eólicas movimentaram cerca de R\$ 321 bilhões na economia, sendo R\$ 110,5 bilhões em investimentos diretos na construção de parques eólicos e R\$ 210,5 bilhões em investimentos indiretos.

O ano de 2021 encerrou com US\$ 5,15 bilhões (R\$ 27,81 bilhões) investidos no setor eólico, representando 44% dos investimentos realizados em renováveis (solar, eólica, biocombustíveis, biomassa e resíduos, PCHs e outros), no Brasil. Considerando o período de 2010 a 2021, o investimento total do setor eólico é de cerca de US \$42,36 bilhões. O gráfico ao lado fornece os dados de investimento e a representatividade do montante eólico no total investido em energias renováveis desde 2010 e calculados pela Bloomberg New Energy Finance - BNEF, que também produz análises dos dados. (ABEEólica, 2021)

Figura 44 - Investimentos em novos projetos no setor Eólico (em milhões de US\$)



Fonte: ABEEólica, 2022

Vale destacar, também, alguns outros fatores: 20% do país pode ser abastecido por eólicas; são criados 10,7 novos postos de trabalho por MW instalado - de 2011 a 2020 a construção de parques eólicos criou quase 196 mil vagas de emprego; a cada R\$ 1,00

investido, tem-se um retorno de R\$ 2,9 no PIB; de 2016 a 2024 o setor eólico terá evitado emissões de gases do efeito estufa valorados entre R\$ 60 e 70 bilhões; a energia eólica impacta positivamente a economia local, aumentando o PIB e o IDH municipal em aproximadamente 22%, um estudo realizado pela GO Associados, comparando municípios que receberam parques eólicos e municípios que não receberam, chegou à conclusão que entre 1999 e 2017 o PIB real aumentou 21,15% e o IDHM cresceu cerca de 20% entre 2000 e 2010. (ABEEÓLICA, 2021)

Figura 45 - Impactos econômicos positivos com a criação de empregos nos parques eólicos offshore

<b>Empregos requeridos para instalação de um parque eólico offshore</b>	<b>Capacidade instalada (MW)</b>	<b>Vida útil do Projeto</b>
8.644	500	25 anos
17.287	1000	25 anos
34.574	2000	25 anos

Fonte: do autor a partir de ABEEÓLICA, 2022c

Como demonstrado na figura 45 acima, mais impactos econômicos positivos serão gerados para o Brasil com o desenvolvimento das eólicas *offshore*. De acordo com a IRENA, estima-se a necessidade de 17 postos de trabalho para cada MW de eólica *offshore*, ao longo de 25 anos de vida útil de um projeto de 500 MW. (Irena, s.d apud ABEEÓLICA, 2022c)

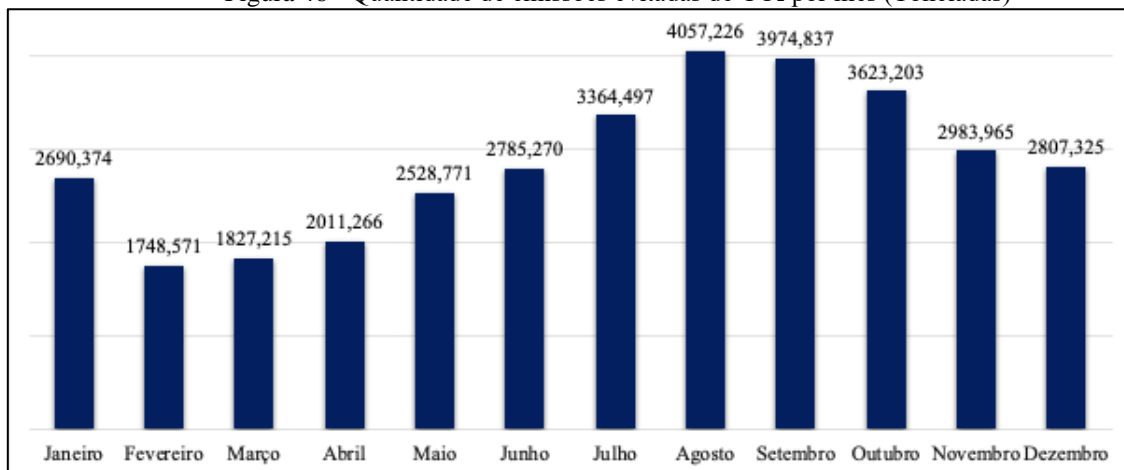
## 2.6 Impactos e contribuições ambientais e socioambientais

Como todas as fontes de energia, a eólica apresenta contribuições e impactos ambientais, mesmo sendo uma energia renovável. Uma contribuição da energia eólica que merece destaque é a não emissão de CO<sub>2</sub> durante a sua operação, possibilitando substituir diversas outras fontes de geração de energia elétrica que emitem esse gás.

A energia eólica é limpa e renovável, não produz resíduos atmosféricos ou nos corpos d'água em seu processo de geração e pouco afeta a direção e a velocidade dos ventos, pois as próprias hélices se adaptam e se orientam em direção a posição favorável para giro. As melhorias tecnológicas que visam a otimização de processos e a redução das perdas de energia na fonte geradora também têm tornado a energia eólica ainda mais sustentável. (CURI, 2022)

No ano de 2021, foi evitada a emissão de 34 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> - emissão de cerca de 34 milhões de carros - devido à energia eólica. De 2016 a 2024, o setor eólico terá evitado emissões de gases do efeito estufa valorados entre R\$ 60 e R\$ 70 bilhões. A figura abaixo demonstra a quantidade de emissão que foi evitada durante os meses do ano de 2021. (ABEEólica, 2022a)

Figura 46 - Quantidade de emissões evitadas de CO<sub>2</sub> por mês (Toneladas)



Fonte: do autor a partir de ABEEÓLICA, 2021.

A energia eólica é considerada renovável e, portanto, contribui para que o Brasil cumpra os objetivos estabelecidos no Acordo do Clima. Além disso, podem ser citados outros benefícios provenientes desse tipo de energia, tais como a liberdade dos proprietários da terra em manter plantações e criações de animais, pois a energia eólica ocupa pouca terra (as turbinas ocupam apenas 8% do espaço, ou até menos que isso). Ademais, existe a possibilidade de gerar renda com o arrendamento da terra para a instalação de torres e apresenta um dos melhores custo-benefício na tarifa de energia. (ABEEólica, 2021)

Apesar de ser uma energia que possui diversos benefícios, ela também apresenta aspectos negativos. Entre eles, a construção dos parques merece destaque, pois, como é nesse momento que acontece a limpeza da área, a criação de canteiros de obra, terraplanagem, construção de bases de concreto, montagem de aerogeradores e estradas de acesso aos parques pelos pode afetar a flora e a fauna do local. A flora pode ser desmatada em diversos pontos pela movimentação intensa na área no momento de construção e, conseqüentemente, a fauna terrestre e alada tende a deixar o habitat. Com o término das construções, esses animais podem voltar ao local, devido ao costume com a área aberta, que já faz parte do seu habitat. (COSTA et al, 2019)

As vegetações predominantes nessas regiões são esparças de distribuição restrita nas áreas de vegetação pioneira. No PEB apresenta vegetação de tabuleiro, dunas, manguezais, mata ciliar e de lagoa, transição tabuleiro – caatinga. No PEF apresenta vegetação pioneira psamófila, floresta à retaguarda das dunas, vegetação dos tabuleiros litorâneos. Pelas respostas aos formulários, comprova-se que tanto as pessoas que moram nas proximidades quanto as que trabalham nos parques em estudo, identifica que houve a suspensão da vegetação nativa apenas nos arredores das torres e nas estradas de acesso, utilizada para passagem de caminhão para montagem e manutenção das torres, porém essa suspensão acontece em locais pontuais dentro do parque, permitindo a criação da pecuária, por parte dos proprietários das terras. Vale destacar que a população percebeu que há uma diminuição e substituição na vegetação no ambiente de instalação, devido à necessidade de conter os transportes de sedimentos das dunas. (COSTA et al, 2019)

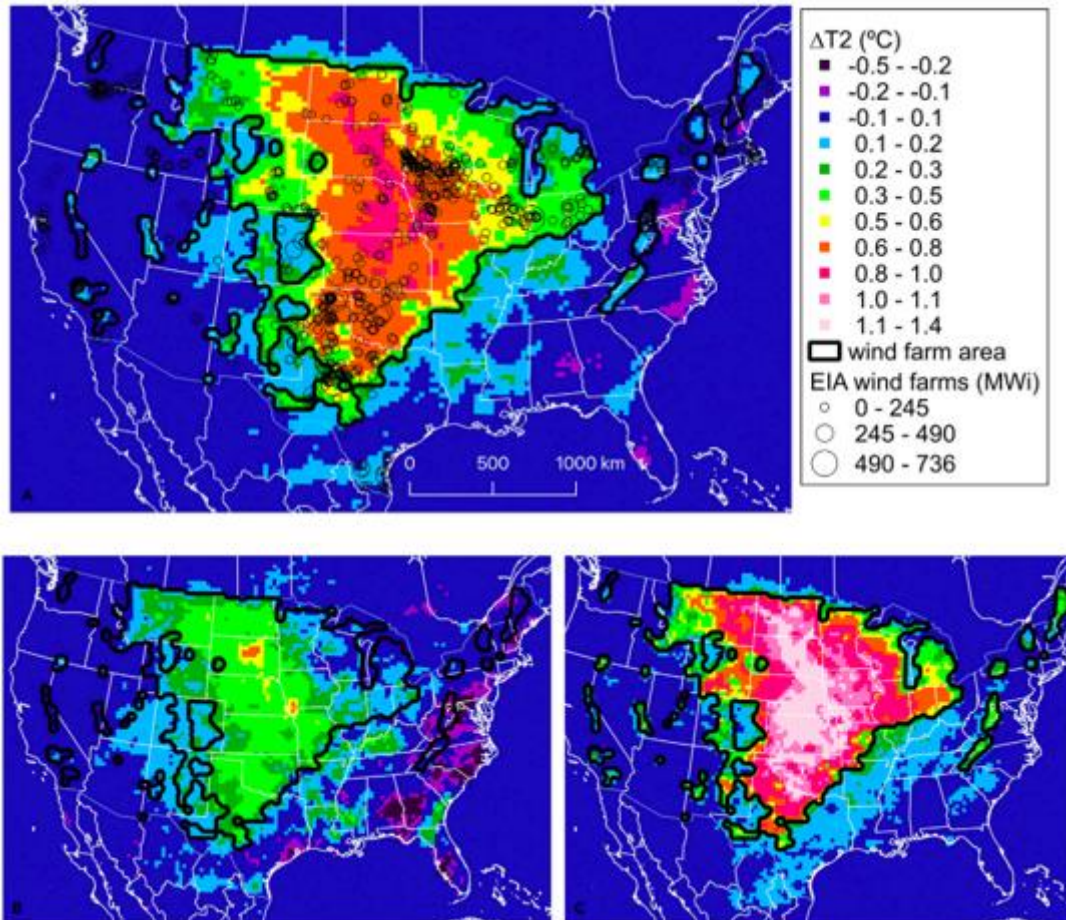
Outro impacto negativo que pode ocorrer é a poluição sonora, causada pelos ruídos provenientes das turbinas. Os ruídos nas proximidades dos parques são insuportáveis, principalmente à noite, o que pode gerar problemas auditivos para moradores da região. Os ruídos podem ter duas origens diferentes: mecânica ou aerodinâmica, sendo que o primeiro se origina na caixa de engrenagens da turbina e o segundo tem relação direta com a velocidade do vento sobre a turbina (TERCIOTE, 2002). Além de impactos sonoros, pode haver, também, uma descaracterização da paisagem devido ao grande porte dos aerogeradores.

Interferências eletromagnéticas também devem ser citados como um dos impactos causados pela energia eólica, pois a operação das turbinas eólicas dentro dos parques eólicos pode causar interferências eletromagnéticas, acarretando distúrbios em sistemas de comunicação.

A interferência eletromagnética pode ser produzida por três elementos do aerogerador: a torre, a rotação das pás e o gerador. As torres podem obstruir refletir ou refratar as ondas eletromagnéticas. Entretanto, as pás modernas são feitas tipicamente de materiais sintéticos (por exemplo, fibra de vidro) que possuem um impacto mínimo na transmissão de radiação eletromagnética. A possível interferência do sistema elétrico pode ser facilmente eliminada com o isolamento apropriado da nacelle e boa manutenção. A interferência com serviços de radiocomunicação móvel é normalmente desprezível e com sinais de TV tem sido minimizada com a substituição das pás de metal por material sintético. Entretanto, quando os aerogeradores são instalados próximos de áreas residenciais, a interferência tem se mostrado mais difícil de eliminar (MARTINS et al, 2017, p. 1092).

Os aerogeradores podem causar o aumento da temperatura, como mostrado na figura abaixo.

Figura 47 - Impactos causados pelos geradores eólicos no aumento na temperatura média



Fonte: KEITH e MILLER, 2018

As figuras mostram os impactos causados pelos geradores eólicos nos Estados Unidos. As regiões de parques eólicos têm um aumento na temperatura média. Esse efeito de aumento de temperatura na parte da noite chega a ser duas vezes maior em comparação com o dia. Na parte central dos parques eólicos, o aquecimento é, geralmente, mais forte. Fora dos parques eólicos, também são apresentadas variações no clima, tendo uma queda de temperatura diurna de até  $0,5^{\circ}\text{C}$ . (KEITH e MILLER, 2018)

Outro impacto negativo ocasionado pela energia eólica é a morte de pássaros. Anualmente, cerca de 214.000 a 368.000 de pássaros morrem anualmente devido às turbinas eólicas. Ao visualizar essa estimativa isoladamente, a conclusão seria de que as turbinas eólicas são responsáveis por uma quantidade expressiva de mortes de pássaros todos os anos. Todavia, torres de rádio e de telecomunicações matam muito mais aves por ano: cerca de 6,8 milhões. Portanto, infere-se que as mortes de aves causadas por turbinas eólicas são, de certa forma, insignificantes quando comparadas às mortes causadas por colisões com torres de rádio e de telecomunicações (REIS, 2019).

É possível, também, citar os impactos ambientais que estão ocorrendo em território brasileiro devido à construção de parques eólicos.

As usinas eólicas estão promovendo profundos impactos ambientais negativos ao longo do litoral nordestino. As que estão operando e as em fase de instalação nos campos de dunas revelaram que a área ocupada pelos aerogeradores é gravemente degradada – terraplenada, fixada, fragmentada, desmatada, compactada, alteradas a morfologia, topografia e fisionomia do campo de dunas -, pois se faz necessário a manutenção de uma rede de vias de acesso para cada um dos aerogeradores e resguardar a base dessas estruturas da erosão eólica. Com isso iniciou-se um generalizado e aleatório processo de fixação artificial das areias, danos aos sítios arqueológicos e privatização destes sistemas ambientais de relevante interesse socioambiental. A nível regional, as pressões causadas pelos efeitos combinados da expansão dos núcleos urbanos, indústrias do turismo, concentração e crescimento populacional e, a médio prazo, acumuladas com as alterações climáticas globais, estão submetendo os campos de dunas e demais sistemas litorâneos associados, a ameaças sem precedentes (MEIRELES, 2011).

Por fim, a produção de energia eólica causa um impacto ambiental que é, muitas vezes, silencioso: o desmatamento da Amazônia. Isso se justifica porque um tipo de madeira encontrada nesse local – o balsa - é utilizada na produção dos aerogeradores, incentivando o desmatamento ilegal, a fim de adquirir essa matéria-prima.

A febre da energia renovável fez disparar a demanda mundial pela madeira desta árvore amazônica que, por ser especialmente leve, é um recurso natural usado na Europa e na China como componente na construção das pás que giram as turbinas eólica construídas como parte da transição energética decorrente da necessidade de descarbonizar a economia. (...) Este aumento da demanda estimulou o desmatamento da Amazônia equatoriana. Proliferaram os balseiros irregulares e ilegais que, com a escassez de madeira cultivada, começaram a cortar maciçamente o balsa selvagem que cresce nas ilhas e várzeas dos rios amazônicos. O impacto desta exploração sobre os povos indígenas da Amazônia equatoriana é muito forte (...) (DALMASES, 2021).

## **2.7 O vento**

A energia eólica provém da radiação solar uma vez que os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre. A diferença de temperatura entre a camada próxima da superfície da terra aquecida pelos raios solares e as camadas superiores da nossa atmosfera gera correntes convectivas. A energia da radiação solar, sendo responsável pelo movimento convectivo do ar, direciona as correntes da nossa

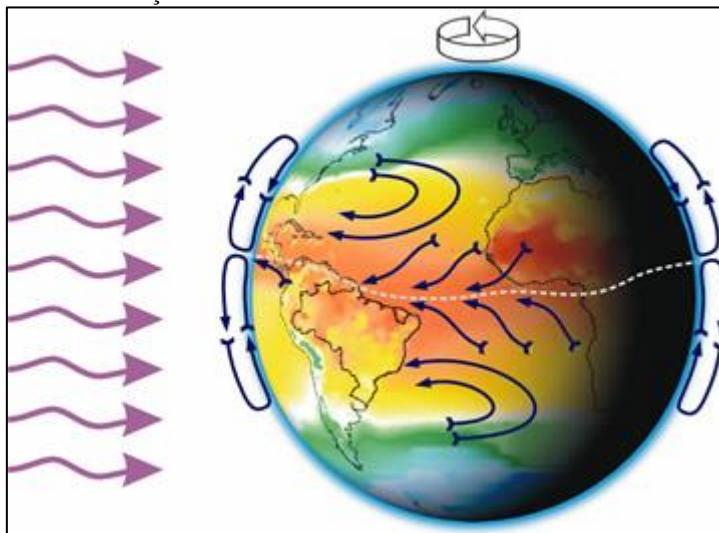


atmosfera, que sobem no equador e descem nos polos, condensando vapores e precipitando energia sob a forma de chuva.

O movimento do ar é fundamental para o desenvolvimento da vida na Terra e em geral, os ventos têm a função de levar ar frio para o Equador e ar quente para os polos, um equilíbrio essencial para as temperaturas (MATIAS, 2022).

As regiões tropicais, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares. Consequentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares. Sendo assim, o ar quente se expande mais, tornando-se menos denso substituindo-se pelo ar frio que é mais denso. O deslocamento de massas de ar determina a formação dos ventos. A figura 48 representa este mecanismo.

Figura 48 - Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar



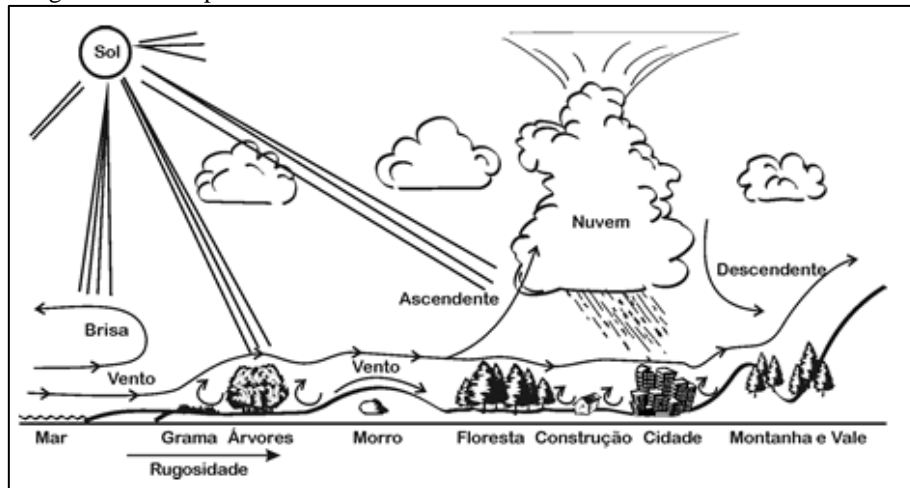
Fonte: Atlas Potencial Eólico do Brasil, 2001.

Existem locais no globo terrestre nos quais os ventos jamais cessam de “soprar”, pois os mecanismos que os produzem (aquecimento no equador e resfriamento nos polos) estão sempre presentes na natureza. São chamados de ventos planetários ou constantes, e podem ser classificados em (CRESESB, 2014):

- Alísios: ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes;
- Contra-alísios: ventos que sopram do Equador para os polos, em altas altitudes;
- Ventos do Oeste: ventos que sopram dos trópicos para os polos;
- Polares: ventos frios que sopram dos polos para as zonas temperadas.

Os ventos que sopram em escala global e aqueles que se manifestam em pequena escala são influenciados por diferentes aspectos entre os quais se destacam a altura, a rugosidade, esta que é caracterizada pela vegetação, utilização da terra e construções; os obstáculos e o relevo, este que pode causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar como observado na figura 49.

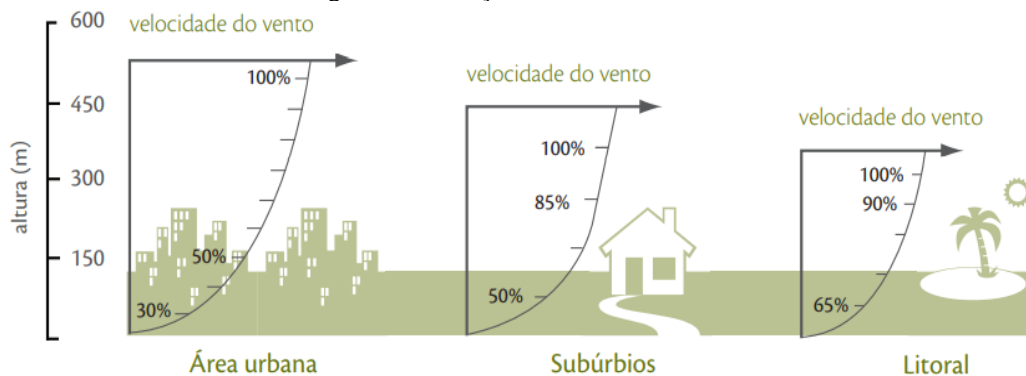
Figura 49 - Comportamento do vento sob a influência das características do terreno



Fonte: CRESESB, 2014.

A direção do vento exprime a posição do horizonte aparente do observador a partir do qual o vento sopra. A direção expressa em termos de azimute, isto é, do ângulo que o vetor velocidade do vento forma com o norte geográfico local ( $0^\circ$ ) (SILVA, 2007). Apresentamos Na figura 50, a relação entre as alturas e velocidades de ventos nas diferentes áreas como a urbana, subúrbio e nível do mar. Podemos perceber que regiões que possuem construções elevadas como prédios só atingem velocidades razoáveis de vento após uma elevada altura. Já nas áreas em que só existem casas e pequenas construções, essa taxa diminui e, assim, em alturas um pouco menores já temos ventos satisfatórios. No último caso mostrado, ao nível do mar, se vê que os ventos já são muito mais rápidos em altitudes menos elevadas que nos exemplos anteriores.

Figura 50 - Relação velocidade do vento x altura



Fonte: JELARE, 2011.

Por ser um fenômeno natural, o vento pode variar dependendo do dia e da estação do ano, a figura 51 mostra as características para um bom aproveitamento do vento com a avaliação da velocidade junto ao vento em terra com a sua respectiva denominação.

Figura 51 - Avaliação da denominação do vento e suas características

Escala	Denominação	Velocidade em m/s	Avaliação do vento em terra
0	Calmo	0 a 0,4 1,44 Km/h	Não se nota nenhum movimento nos galhos das árvores.
1	Quase calmo	0,5 a 1,5 1,8-5,4 Km/h	A direção da fumaça sofre um pequeno desvio.
2	Brisa leve	1,6 a 3,4 6-12 Km/h	As folhas são levemente agitadas.
3	Vento fresco	3,5 a 5,5 13-20 Km/h	As folhas ficam em agitação contínua.
4	Vento moderado	5,6 a 8 20,6-29 Km/h	Poeira e pedaços de madeira são levantados.
5	Vento regular	8,1 a 10,9 29-39 Km/h	As árvores pequenas começam oscilar.
6	Vento meio forte	11,4 a 13,9 41-50 Km/h	Galhos maiores ficam agitados.
7	Vento forte	14,1 a 16,9 50-60 Km/h	Torna-se difícil andar contra o vento.
8	Vento muito forte	17,4 a 20,4 61-73 Km/h	Fica impossível andar contra o vento.
9	Ventania	20,5 a 23,9 74-86 Km/h	Telhas podem ser arrancadas.
10	Vendaval	24,4 a 28 88-100 Km/h	Árvores são derrubadas.
12	Furacão	83,0 a 125 298-450 Km/h	Produzem efeitos devastadores.

Fonte: JELARE, 2011.

## 2.8 Sistemas Eólicos

O sistema eólico é constituído por vários componentes de forma a propiciar um maior rendimento final. Para efeito de estudo global da conversão eólica as principais partes de componentes de uma instalação eólica para geração de eletricidade são (NETO & CARVALHO, 2009):

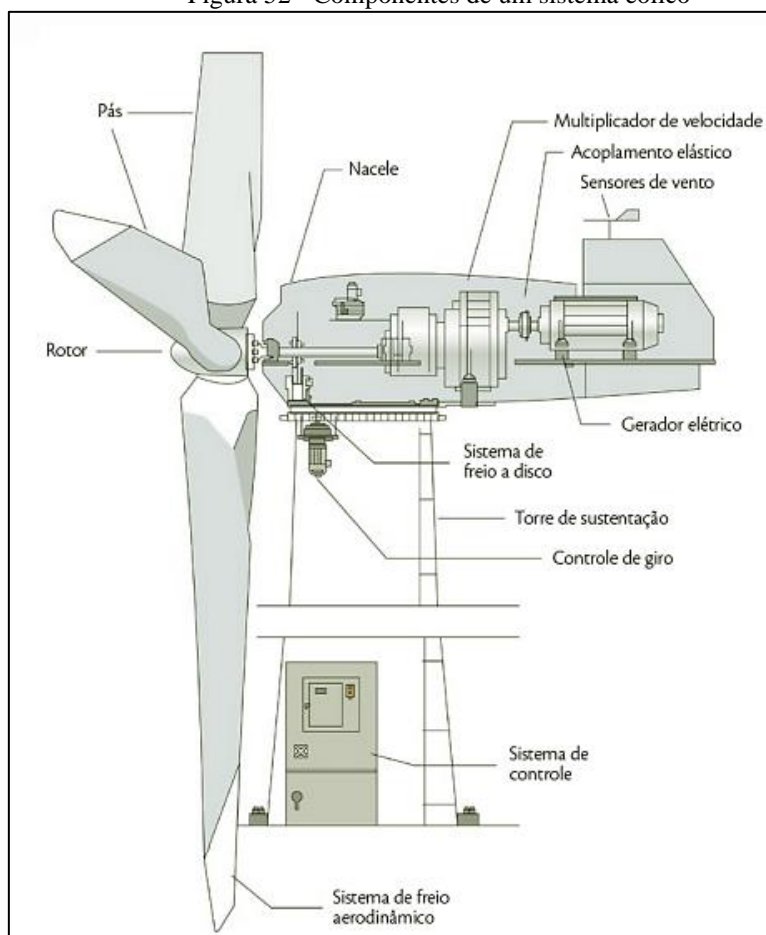
- Vento: disponibilidade energética do local destinado a construção.
- Pás: o conjunto das pás, na maioria dos casos iguais a três, é denominado rotor. Visando ao uso em máquinas para a geração de eletricidade, as pás devem conciliar uma série de características, entre as quais podem ser citadas a leveza, fortaleza, e bom rendimento aerodinâmico. Na maior parte das aplicações, as pás são produzidas assumindo contorno retangular ou trapezoidal, sendo esta última a forma mais usada em unidades de médio e grande portes, em razão do alto rendimento aerodinâmico. Quanto

ao comprimento, as pás variam de cerca de 0,40 metro para unidades de 100W de potência até cerca de 52 metros para unidades com 4,5 MW de potência. Quanto ao material de fabricação, as pás modernas usam, na maioria dos casos, compostos de epóxi e poliéster reforçados com fibra de vidro. Pesquisas têm mostrado que o uso de fibras vegetais brasileiras na confecção de pás para unidades de pequeno porte tem se revelado uma opção viável.

- Cubo: constitui elemento de conexão das pás, transmitindo forças, conjugados e vibrações atuantes sobre as pás para o eixo do rotor.
- Nacele: é carcaça montada sobre a torre, onde se situam o gerador, a caixa de engrenagens (quando utilizada), todo o sistema de controle, medição do vento e motores para rotação do sistema para o melhor posicionamento em relação ao vento.
- Eixo do rotor: responsável por transformar energia cinética do vento em energia mecânica de rotação.
- Caixa de engrenagens: responsável por transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até a carga. Presente na maioria das instalações interligadas à rede elétrica, funciona como elemento de ligação entre a baixa rotação das pás e a elevada rotação do gerador elétrico.
- Gerador elétrico: elemento responsável pela geração de eletricidade. Em geral, são empregadas máquinas de indução ou síncronas convencionais para unidades de média e grande potência. Para unidades de pequena potência, são empregadas também máquinas síncronas com excitação via ímãs permanentes.
- Circuitos eletrônicos: assumem diversas tarefas, como desacoplamento elétrico entre o gerador e a rede por intermédio de circuitos retificadores-inversores, visando à operação em velocidade variável das turbinas e à entrega dentro das exigências de qualidade de energia.
- Mecanismo de controle: são responsáveis por diferentes tarefas, como o acionamento do deslocamento angular das pás em torno do eixo, do acompanhamento da direção do vento pela nacele e controle de carga.
- Transformador: responsável pelo acoplamento elétrico entre o aerogerador e a rede elétrica.

- Torre: constitui o elemento de sustentação da nacelle, recipiente no interior no qual estão localizados a caixa de engrenagens e o gerador elétrico. As primeiras torres de treliça deram lugar a torres de aço, com alturas que podem chegar a 124 metros.
- Tipo de construção: *onshore* e *offshore*

Figura 52 - Componentes de um sistema eólico



Fonte: JELARE, 2011.

### 2.8.1 Nacelle

A nacelle é o componente da turbina responsável por abrigar, fundamentalmente, os equipamentos e mecanismos responsáveis pela transformação da energia cinética em energia elétrica. Basicamente, existe dois tipos de nacelle, com e sem caixa de velocidades. (SOARES, 2017)

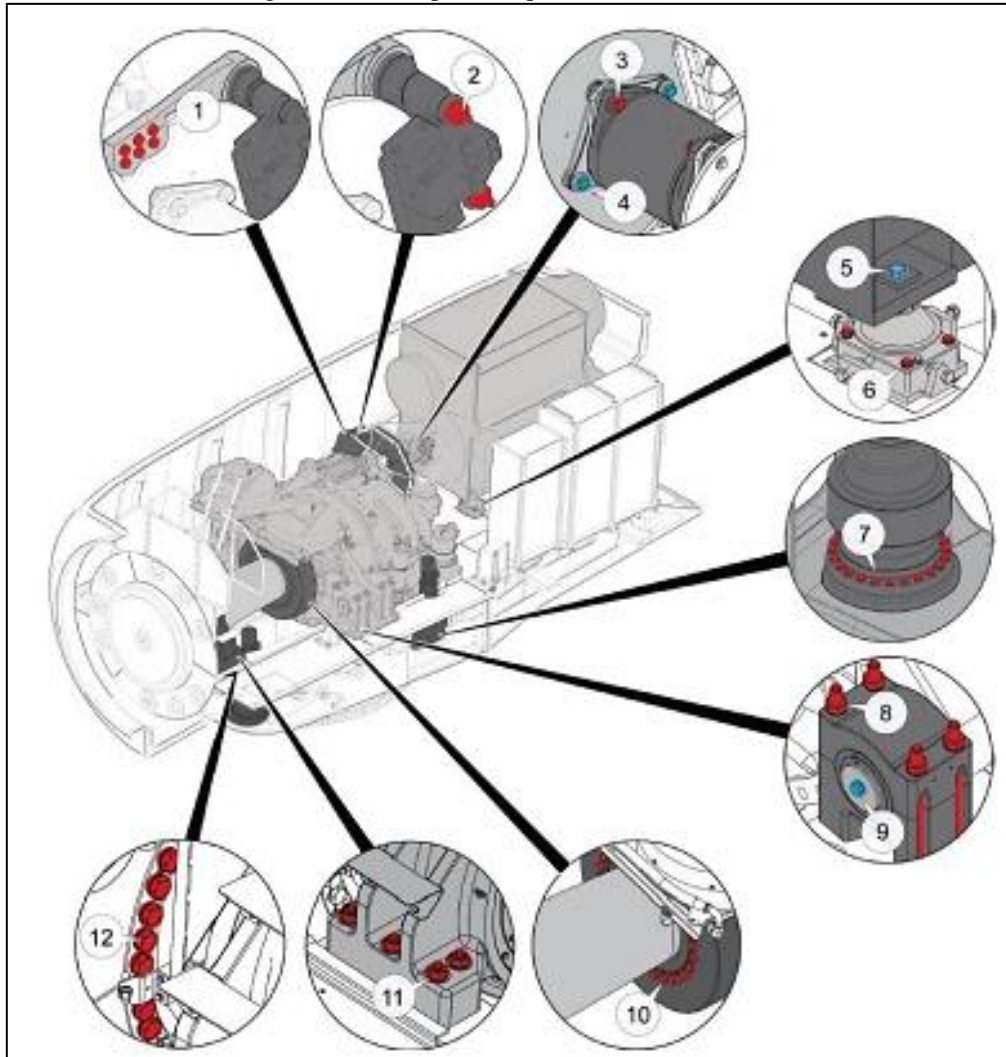
Os principais componentes internos da nacelle fazem parte da transmissão da rotação do Rotor, por meio do eixo principal. Além do eixo, com redutor, mancais de suporte e acoplamento, existem ainda os dispositivos de freios do Rotor, com bomba hidráulica; os dispositivos de mudança de posição da nacelle, de acordo com direção do

vento, com um mecanismo cremalheira – motorreduzores. E, os componentes do sistema de monitoramento e controle, além de um gerador eletromecânico. Basicamente, os componentes internos de uma nacela, são: (SOARES, 2017)

- Sistema mecânico de transmissão de movimento de rotação do rotor até o gerador – o eixo principal (main shaft), com a caixa de velocidades (gearbox) e os mancais do eixo principal (main shaft bearing), são os principais responsáveis pelo acionamento do gerador. A ligação entre o eixo principal e o gerador é feita por meio de um acoplamento flexível. E, o alinhamento das pontas do eixo principal e com a ponta de eixo do gerador, de modo que permita a montagem do acoplamento, em condições mínimas de tolerância de medidas radial e axial, é uma atividade chamada de alinhamento de gerador.
- Sistema mecânico de giro da nacela – a turbina eólica busca a posição alinhada com a direção do vento. Em regiões em que o vento muda constantemente de direção, é comum observar a mudança de direção da nacela. Motorreduzores (Yaw motor), engrenados numa engrenagem externa, instalada sobre um mancal, permite um giro da nacela de até 360°.

A nacela com caixa multiplicadora, conforme figura 53, possui os seguintes componentes vista de cima:

Figura 53 - Principais componentes da nacele vista de cima



1 e 2 - Dispositivo de freio do rotor

3 e 4 - Acoplamento flexível

5 e 6 - Dispositivo anti-vibração da base do gerador

7 - Unidade de guinada (giro em função da mudança de direção do vento)

8 e 9 - Suporte de fixação do quadro de apoio da caixa de velocidade

10 - Mancal do eixo principal, na conexão com a caixa de velocidade

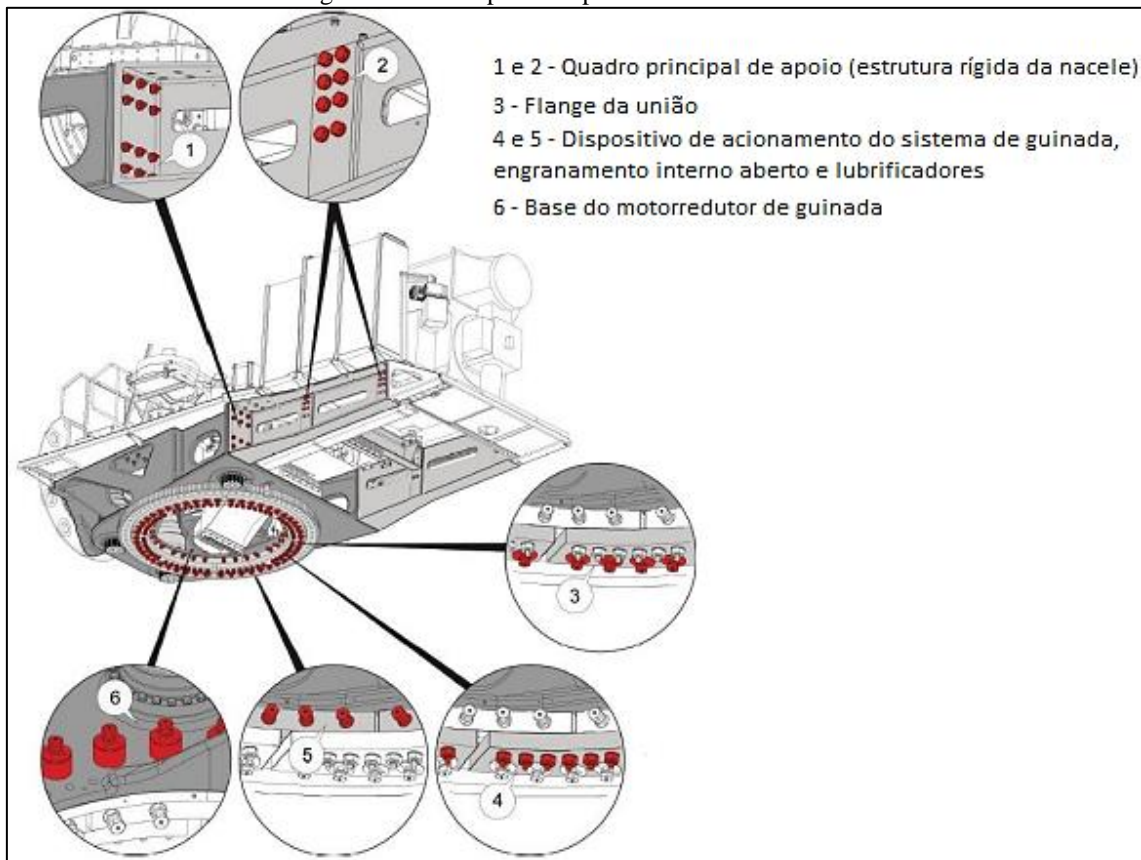
11 - Mancal do eixo principal, na conexão com o rotor

12 - Flange da união rotor-nacelle

Fonte: SOARES, 2017.

E para a vista de baixo, temos:

Figura 54 - Principais componentes da nacele vista de baixo



Fonte: SOARES, 2017.

## 2.8.2 Rotores

Os aerogeradores costumam ser classificados pela posição do eixo do seu rotor, que pode ser vertical ou horizontal. A seguir, mencionaremos os principais modelos relativos aos tipos de classificação mencionados.

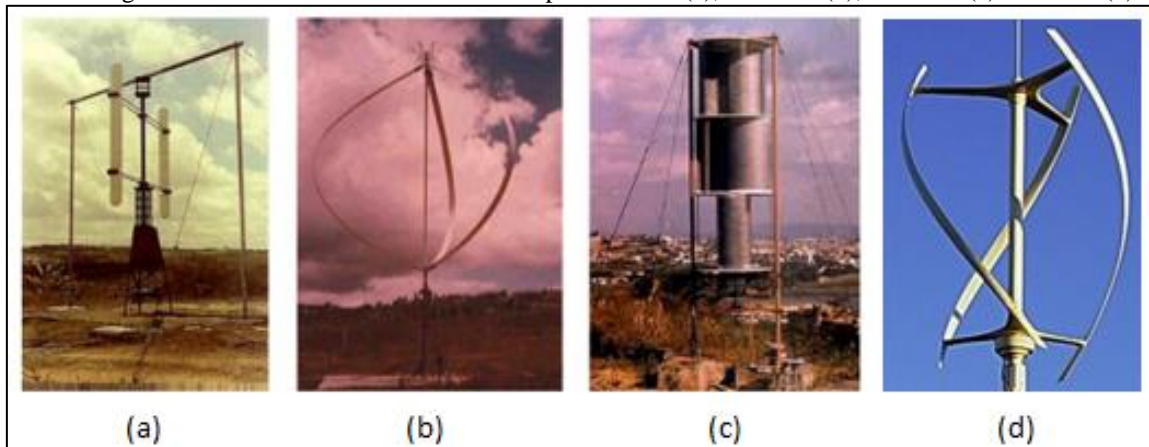
### 2.8.2.1 – Eixo Vertical

Em sua maioria, os rotores de eixo vertical têm a vantagem de não precisarem de mecanismos de acompanhamento para variações da direção do vento, reduzindo as complicações do projeto e os esforços devido às forças de Coriolis. As principais vantagens são o design rudimentar, bom desempenho para aplicações de alta turbulência e manutenção minimizada e com baixos custos. A principal desvantagem das TEEV é a menor eficiência de produção de energia quando comparadas as turbinas de eixo horizontal devido ao movimento de rotação, tendo constantemente seus ângulos de ataque e de deslocamento alterados em relação à direção dos ventos, gerando forças resultantes alternadas, limitando o seu rendimento. Porém, tem tido um grande aumento nas regiões remotas e nos centros urbanos por possuírem rotores com diâmetros de pequenas dimensões.



Os rotores de eixo vertical também podem ser movidos por forças de sustentação e por forças de arrasto. Os principais tipos de rotores de eixo vertical são Savonius, Darrieus, Giromill e Gorlov. (Figura 55)

Figura 55 - Turbinas de eixo vertical do tipo Savonius (a), Darrieus (b), Giromill (c) e Gorlov (d)



Fonte: adaptado pelo autor a partir de JELARE, 2011 e MARIN, 2016.

### 2.8.2.2 – Eixo Horizontal

Representam quase toda a gama de geradores eólicos comerciais e necessitam de um mecanismo que permita o posicionamento do eixo do rotor em relação à direção do vento, para um melhor aproveitamento, principalmente onde tem muita mudança na direção dos ventos e seus modelos se diferem pelos números de pás variando conforme a necessidade de aplicação. Os mais comuns são: TEEH de uma, duas, três ou multipás (figura 14).

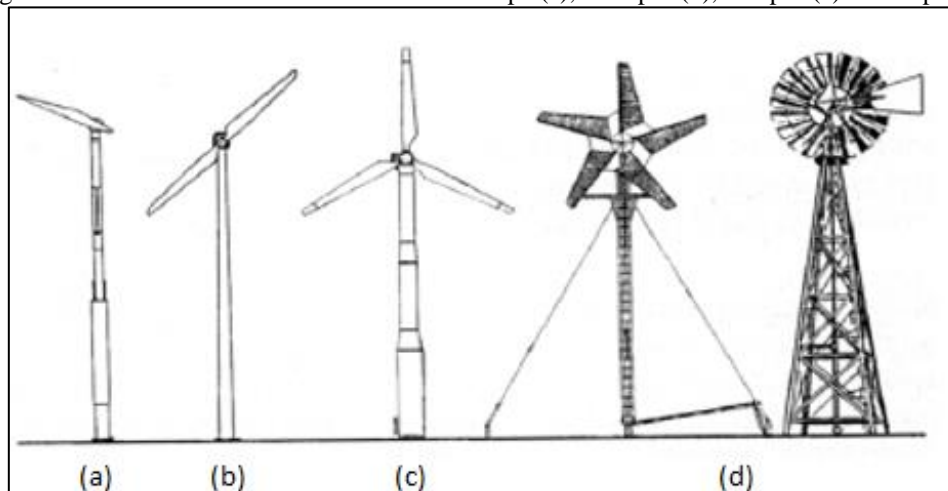
TEEH de uma pá: uma configuração pouco usada que apresenta grandes oscilações no conjugado desenvolvido durante a rotação da única pá. Além dessa barreira, possui as desvantagens de esforços extras e um nível maior de emissão de ruído em razão da velocidade de ponta de pá de cerca de 120 m/s (NETO & CARVALHO, 2012).

TEEH de duas pás: menor custo decorrente da redução de uma pá em relação à estrutura de três pás apresenta desvantagem do aumento de custo relacionado aos maiores esforços mecânicos. No entanto, turbinas de duas pás, que operam com maiores valores de velocidade específica e, conseqüentemente, maiores valores do coeficiente de potência, podem assumir importante participação em parques eólicos marítimos, em que aspectos como o nível de ruído não teriam o mesmo impacto que possuem as unidades em terra (NETO & CARVALHO, 2012).

TEEH de três pás: representa a configuração mais usada comercialmente, com o desenvolvimento do mercado alemão relevando, desde 1997, que a totalidade dos geradores instalados possuem três pás. As principais razões desse domínio são os menores esforços mecânicos, a maior aceitação do ponto de vista do impacto visual e menor emissão de ruído, em comparação com a configuração de duas ou de uma pá. O menor ruído se deve ao fato de a velocidade de ponta de pá não ultrapassar o valor de 70 m/s (NETO & CARVALHO, 2012).

TEEH multipás: atualmente representa a maioria das instalações eólicas, tendo sua maior aplicação no bombeamento d'água. Suas características tornam seu uso mais próprio para aeromotores, pois dispõe de uma boa relação torque de partida/área de varredura do rotor, mesmo para ventos fracos. Em contrapartida, seu melhor rendimento encontra-se nas baixas velocidades, limitando a potência máxima extraída por área do rotor, que não é das melhores, tornando esse tipo pouco indicado para geração de energia elétrica. Com o desenvolvimento da eletrônica, os sistemas atuais podem ser facilmente projetados para uma faixa de velocidade bastante ampla e com um rendimento bastante satisfatório, passando o fator determinante a ser a potência obtida pelo rotor em relação à área de varredura, em que os modelos de duas e três pás se destacam com um rendimento muito superior (JELARE, 2011).

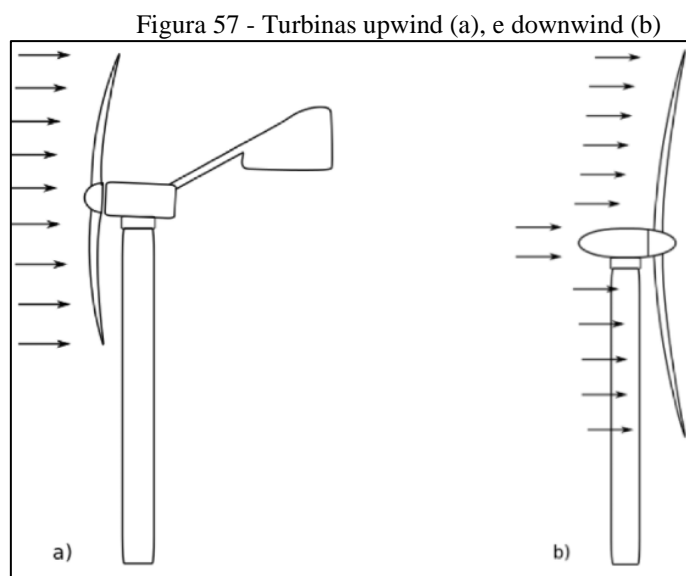
Figura 56 - Turbinas de eixo horizontal com uma pá (a), duas pás (b), três pás (c) e multipás (d)



Fonte: PUC-RJ, 2022.

As turbinas de eixo horizontal ainda podem ser classificadas de acordo com a posição do rotor em relação à torre. Podem ser turbinas downwind (a jusante), que possuem uma inclinação na colocação das pás e recebem o vento por trás da turbina eólica, por isso não necessitam de um mecanismo de direcionamento. Entretanto, esta

configuração exige maior flexibilidade do rotor, gerando ruídos audíveis que dificultam a autorização e a aceitação deste tipo de turbina. Nas turbinas upwind (a montante), o rotor eólico é montado antes da torre, ou seja, o vento incide primeiramente sobre o rotor, e, portanto, é necessário controle ativo para orientação do rotor em relação ao vento. O modelo upwind é o mais utilizado, principalmente em turbinas de grande porte. Ver figura 57.



Fonte: Wind Turbines, 2016.

### 2.8.3 Transmissão e caixas de engrenagem

A transmissão, que engloba a caixa multiplicadora, possui a finalidade de transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até o gerador. É composta por eixos, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamentos (CRESESB, 2014). Quanto as categorias de classificação das caixas de engrenagem temos:

Com multiplicador: serve como elemento de ligação entre a baixa rotação das pás e a elevada rotação do gerador elétrico, geralmente de quatro a seis polos. O projeto tradicional de uma turbina eólica consiste em colocar a caixa de transmissão mecânica entre o rotor e o gerador. A velocidade angular dos rotores geralmente varia na faixa de 20 a 150 rpm, devido às restrições de velocidade na ponta da pá. Entretanto, geradores (sobretudo geradores síncronos) trabalham em rotações muito mais elevadas (em geral, entre 1.200 e 1.800 rpm), tornando necessária a instalação de um sistema de multiplicação entre os eixos. (Figura 58)

Acionamento direto: neste caso, ao invés de utilizar a caixa de engrenagens com alta relação de transmissão necessária para alcançar a elevada rotação dos geradores, utilizam-se geradores com elevado número de polos de baixa velocidade e grandes dimensões.

Os dois tipos de projetos possuem suas vantagens e desvantagens e a decisão em usar o multiplicador ou fabricar um aerogerador sem caixa de transmissão é, antes de tudo, uma questão de filosofia do fabricante (MONTEZANO, 2007)

Figura 58 - Caixa multiplicadora conectada ao gerador (vista à direita)



Fonte: MONTEZANO, 2007.

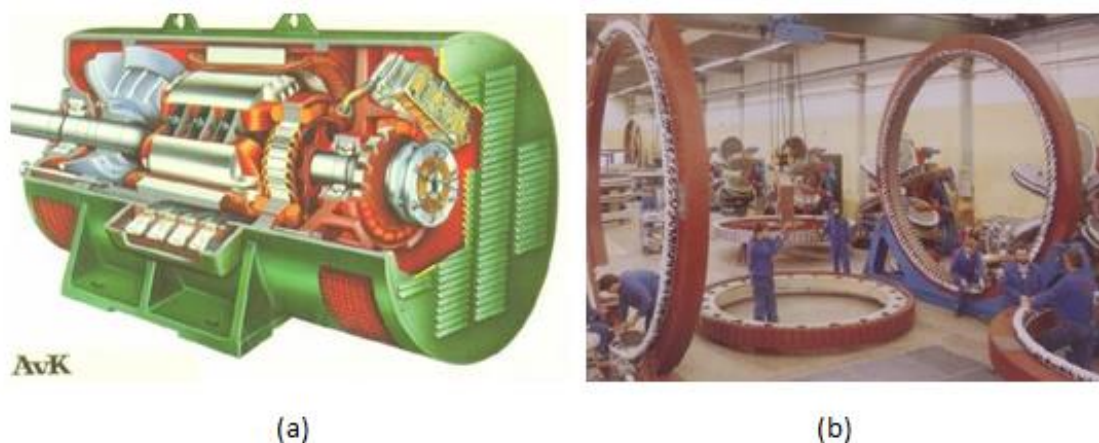
#### 2.8.4 Geradores

A transformação da energia mecânica de rotação em energia elétrica através de equipamentos de conversão eletromecânica é um problema tecnologicamente dominado e, portanto, encontram-se vários fabricantes de geradores disponíveis no mercado. Entretanto, a integração de geradores no sistema de conversão eólica constitui-se em um grande problema, que envolve principalmente (DUTRA, 2001):

- variações na velocidade do vento (extensa faixa de rotações por minuto para a geração);
- variações do torque de entrada (uma vez que variações na velocidade do vento induzem variações de potência disponível no eixo);
- exigência de frequência e tensão constante na energia final produzida;
- dificuldade de instalação, operação e manutenção devido ao isolamento geográfico de tais sistemas, sobretudo em caso de pequena escala de produção (isto é, necessitam ter alta confiabilidade).

Atualmente, existem várias alternativas de conjuntos moto-geradores, entre eles: geradores de corrente contínua, geradores síncronos, geradores assíncronos, geradores de comutador de corrente alternada. Cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens que devem ser analisadas com cuidado na sua incorporação ao sistema de conversão de energia eólica (CRESESB, 2014). (Figura 59)

Figura 59 - Gerador convencional (a), gerador com multipolos (b)



Fonte: Dutra, 2007.

O gerador síncrono possui como principais características o enrolamento de armadura no estator e enrolamento de campo no rotor, na quase totalidade dos casos; frequência elétrica sincronizada com a velocidade mecânica de rotação do eixo por meio da relação:

(2.8.4.1)

$$f = \frac{P}{2} \times \frac{n}{60}$$

Em que P representa o número de polos, f, a frequência e m, a velocidade de rotação mecânica em rpm. A quase totalidade dos geradores eólicos de pequeno porte utiliza ímãs no lugar do enrolamento de campo.

Já o gerador de indução, o funcionamento equivale ao de um transformador no qual ocorre transformação de potência elétrica entre estator e o rotor com mudança de frequência. Em uso como gerador, o eixo da máquina assíncrono é movido com velocidade maior do que a velocidade síncrona. A relação entre a velocidade de rotação no eixo e a velocidade síncrona  $n_1$  é dada por:

(2.8.4.2)

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

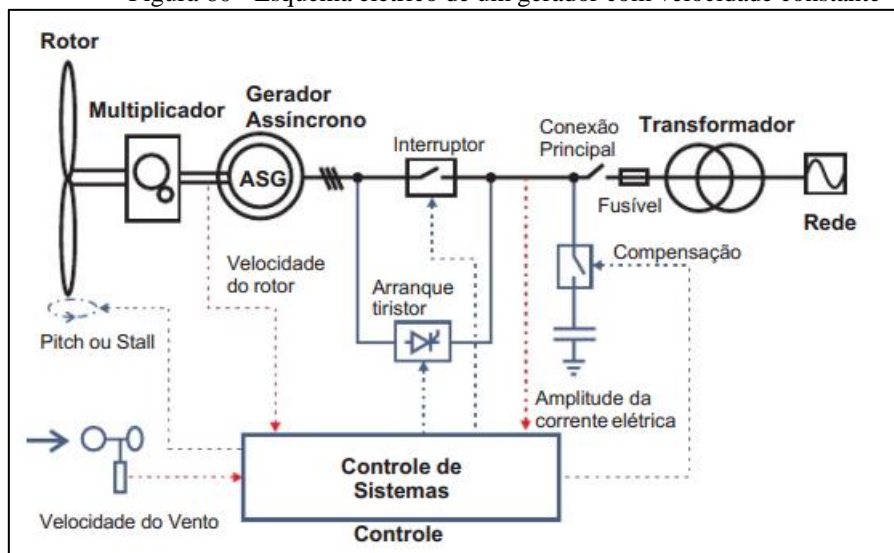
em que  $s$  representa o escorregamento por unidade.

#### 2.8.4.1 Aerogerador com velocidade constante

Nos aerogeradores com velocidade constante, o gerador é diretamente conectado à rede elétrica. A frequência da rede determina a rotação do gerador e, portanto, a do aerogerador. A baixa rotação do aerogerador é transmitida ao gerador, de rotação por um multiplicador com relação de transmissão. A velocidade do gerador depende do número de polos e da frequência do sistema elétrico.

A figura 60 mostra um esquema elétrico de um aerogerador com velocidade constante. Estas máquinas usam geradores elétricos assíncronos ou de indução, cuja maior vantagem é sua construção simples e barata, além de dispensarem dispositivos de sincronismo. As desvantagens destes geradores são as altas correntes de partida e sua demanda por potência reativa. As altas correntes de partida podem ser suavizadas por um tiristor de corrente, ou de partida. (DUTRA, 2007)

Figura 60 - Esquema elétrico de um gerador com velocidade constante



Fonte: DUTRA, 2007.

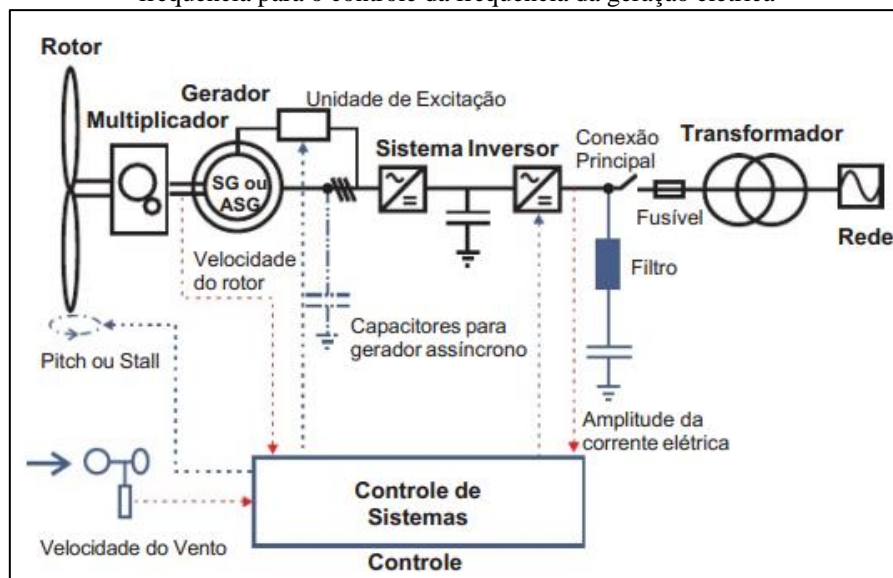
#### 2.8.4.2 Aerogerador com velocidade variável

Os aerogeradores com velocidade variável podem usar geradores síncronos ou assíncronos como mostra a figura 61. A conexão ao sistema elétrico é feita por meio de um conversor de frequência eletrônico, formado por um conjunto retificador/inversor. A tensão produzida pelo gerador síncrono é retificada e a corrente contínua resultante é

invertida, com o controle da frequência de saída sendo feito eletronicamente através dos tiristores. Como a frequência produzida pelo gerador depende de sua rotação, esta será variável em função da variação da rotação da turbina eólica. Entretanto, por meio do conversor, a frequência da energia elétrica fornecida pelo aerogerador será constante e sincronizada com o sistema elétrico. (DUTRA, 2007)

A operação em velocidade variável possibilita que a velocidade específica seja mantida constante, para diversos valores de velocidade do vento, no valor que conduz ao máximo coeficiente de potência, otimizando o funcionamento da instalação. (NETO & CARVALHO, 2012)

Figura 61 - Esquema elétrico de um gerador com velocidade variável que usa um conversor de frequência para o controle da frequência da geração elétrica



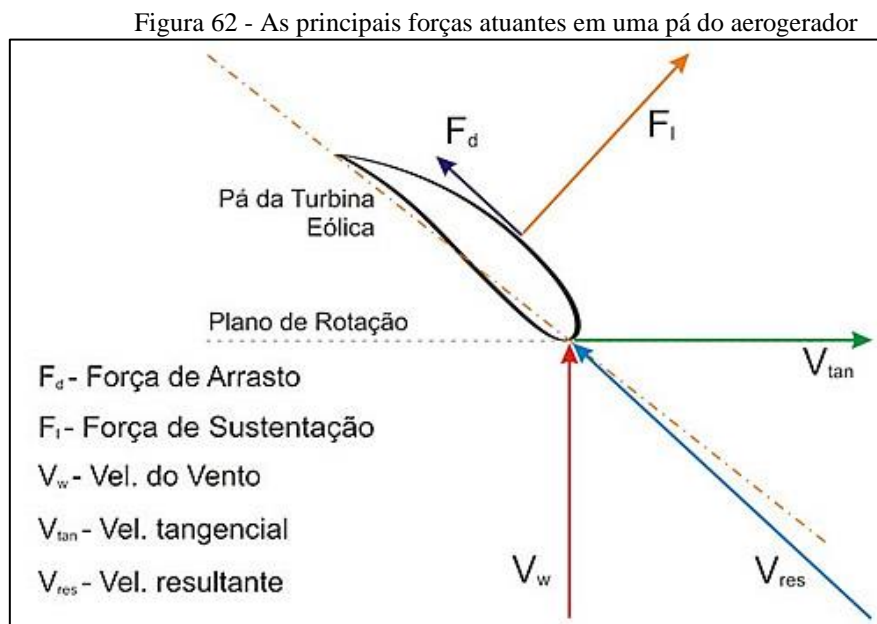
Fonte: DUTRA, 2007.

### 2.8.5 Mecanismo de controle

Os mecanismos de controle destinam-se à orientação do rotor, ao controle de velocidade, ao controle de carga etc. Pela variedade de controles, existe uma enorme variedade de mecanismos que podem ser mecânicos (velocidade, passo, freio), aerodinâmicos (posicionamento do rotor) ou eletrônicos (controle da carga).

Os modernos aerogeradores utilizam dois diferentes princípios de controle aerodinâmico para limitar a extração de potência a potência nominal do aerogerador. São chamados de controle estol (Stall) e controle de passo (Pitch). No passado, a maioria dos aerogeradores usavam o controle estol simples; atualmente, entretanto, com o aumento do tamanho das máquinas, os fabricantes estão optando pelo sistema de controle de passo, que oferece maior flexibilidade na operação das turbinas eólicas (DUTRA, 2007).

Na figura 62, vemos as forças atuantes na pá para que possamos entender o funcionamento do mecanismo de controle.



Fonte: CRESESB, 2014.

A figura acima mostra as principais forças atuantes em uma pá do aerogerador, assim como os ângulos de ataque ( $\alpha$ ) e de passo ( $\beta$ ). A força de sustentação é perpendicular ao fluxo do vento resultante visto pela pá ( $V_{res}$ ), resultado da subtração vetorial da velocidade do vento incidente ( $V_w$ ) com a velocidade tangencial da pá do aerogerador ( $V_{tan}$ ), conforme a equação (2.11.12) (CRESESB, 2014).

A força de arrasto é produzida na mesma direção de  $V_{res}$ . A resultante das componentes da força de sustentação e de arrasto na direção  $V_{tan}$ , produz o torque do aerogerador.

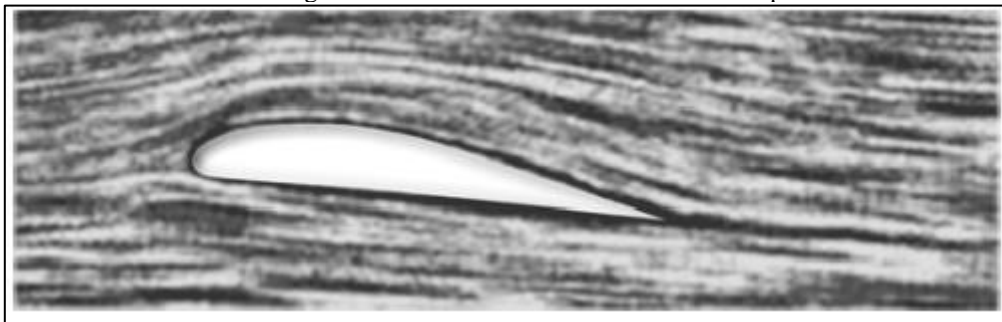
### 2.8.5.1 – Controle de Passo

O controle de passo é um sistema ativo que normalmente necessita de uma informação vinda do sistema de controle. Sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada, devido à um aumento da velocidade do vento, as pás do rotor giram em torno do seu eixo longitudinal; em outras palavras, as pás mudam o seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque. Esta redução do ângulo de ataque diminui as forças aerodinâmicas atuantes e, conseqüentemente, a extração de potência do vento. Para todas as velocidades de vento superiores à velocidade nominal, o ângulo é escolhido de forma que o aerogerador produza apenas a potência nominal. Sob todas as condições de vento,



o escoamento em torno dos perfis das pás do rotor é bastante aderente à superfície produzindo, portanto, sustentação aerodinâmica e pequenas forças de arrasto. (Figura 63)

Figura 63 - Fluxo de escoamento aderente ao perfil



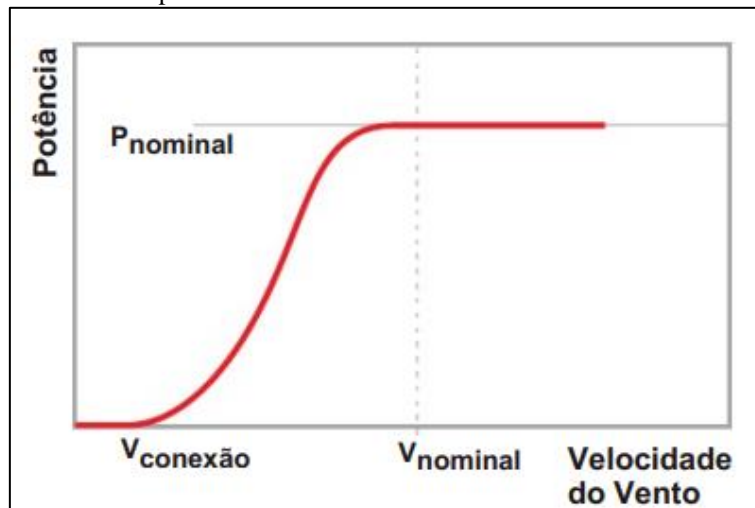
Fonte: DUTRA, 2007.

Aerogeradores com controle de passo são mais sofisticadas do que as de passo fixo, controladas por estol, porque necessitam de um sistema de variação de passo. Por outro lado, elas possuem certas vantagens (DUTRA, 2007):

- permitem controle de potência ativo sob todas as condições de vento, também sob potências parciais;
- alcançam a potência nominal mesmo sob condições de baixa massa específica do ar (grandes altitudes dos sítios, altas temperaturas);
- maior produção de energia sob as mesmas condições (sem diminuição da eficiência na adaptação ao estol da pá);
- partida simples do rotor pela mudança do passo;
- cargas das pás do rotor decrescentes com ventos aumentando acima da potência nominal;
- posição de embandeiramento das pás do rotor para cargas pequenas em ventos extremos;
- massas das pás do rotor menores levam a massas menores dos aerogeradores.

As desvantagens são o maior custo, maior complexidade técnica e maior manutenção. Para turbinas de grande potência, a combinação de velocidade variável com controle de passo tem se tornado a opção mais escolhida. A figura 64 apresenta a curva de potência dessa unidade, na qual pode ser verificada a vantagem de a manutenção da potência fornecida pelo gerador após a potência nominal ter sido alcançada.

Figura 64 - Curva de potência de uma unidade eólica com controle de estol de passo

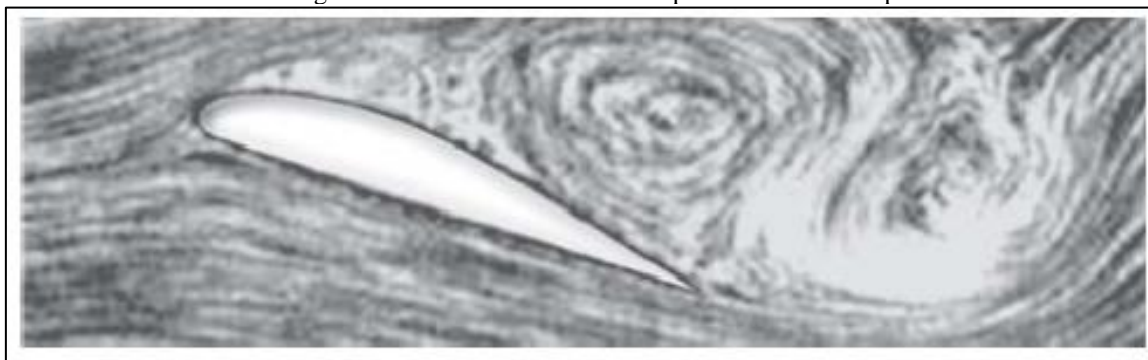


Fonte: DUTRA, 2007.

### 2.8.5.2 – Controle Estol

O controle estol é um sistema passivo que reage à velocidade do vento. Esta estratégia é usada principalmente em unidades eólicas de pequeno porte. Apresenta pás com ângulo de passo constante, ou seja, fixo, o qual é escolhido de modo que, para a velocidade de vento maiores que a nominal, o que significa um aumento do ângulo de ataque acima de um valor limite, o escoamento inicial laminar em torno do perfil da pá se separe da superfície dela, caracterizando um escoamento turbulento produzindo, portanto, sustentações menores e forças de arrasto muito mais elevadas (Figura 65). Como consequências, ocorrem perdas aerodinâmicas que levam a uma limitação da potência extraída.

Figura 65 - Fluxo de escoamento separado em volta do perfil



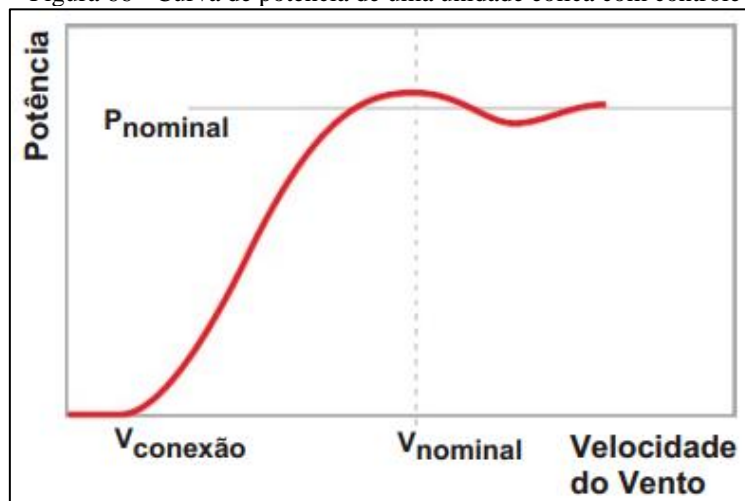
Fonte: DUTRA, 2007.

Aerogeradores com controle estol são mais simples do que as de controle de passo porque elas não necessitam de um sistema de mudança de passo. Em comparação com os aerogeradores com controle de passo, eles possuem, em princípio, as seguintes vantagens (DUTRA, 2007):

- inexistência de sistema de controle de passo;
- estrutura de cubo do rotor simples;
- menor manutenção devido ao menor número de peças móveis;
- auto confiabilidade do controle de potência.

Podemos observar na figura 66 que a curva de potência dessa unidade, em que pode ser verificada a desvantagem de uma redução da potência fornecida pelo gerador após a potência nominal ter sido alcançada. A principal vantagem é o menor custo em relação a estratégia de controle de passo.

Figura 66 - Curva de potência de uma unidade eólica com controle de estol



Fonte: DUTRA, 2007.

### 2.8.6 Torre

As torres são necessárias para sustentar e posicionar o rotor a uma altura conveniente para o seu funcionamento. É um item estrutural de grande porte e de elevada contribuição no custo do sistema. Inicialmente, as turbinas utilizavam torres de metal treliçado. Com o uso de geradores com potências cada vez maiores, as naceles passaram a sustentar um peso muito elevado tanto do gerador quanto das pás. Desta forma, para dar maior mobilidade e segurança para sustentar toda a nacele em alturas cada vez maiores, tem-se utilizado torres de metal tubular ou de concreto que podem ser sustentadas ou não por cabos tensores. (DUTRA, 2007).

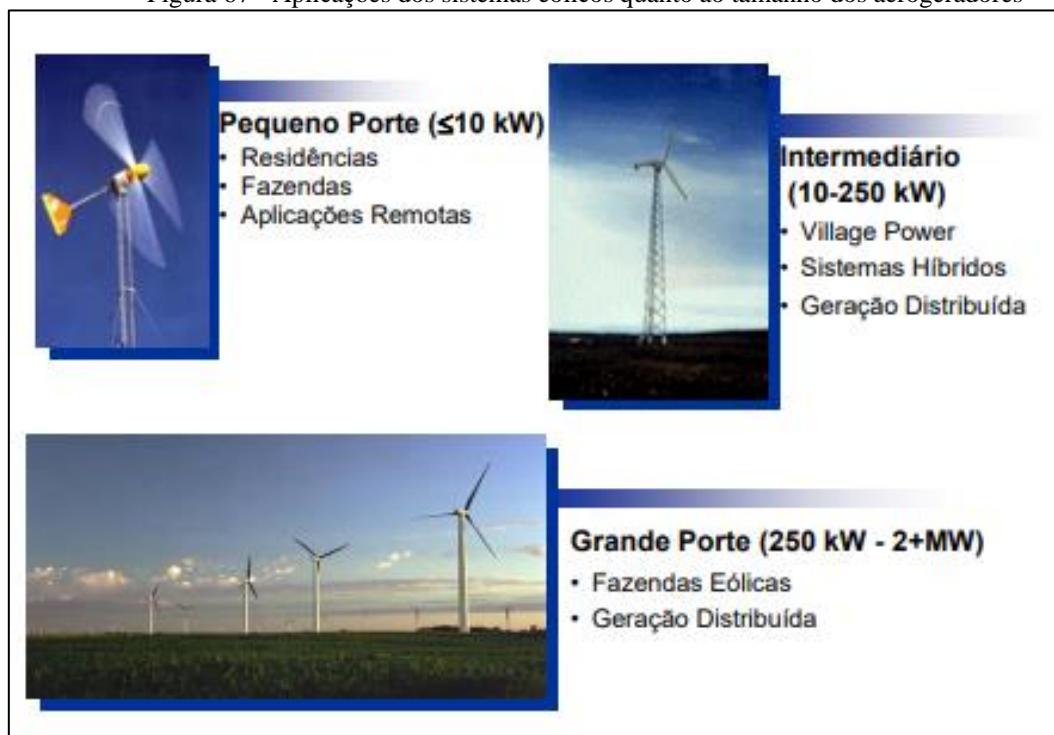
### 2.8.7 Tipo de construção

A energia eólica é gerada ao transformar o movimento das correntes de ar em energia elétrica. Para aproveitar o vento, são construídos enormes complexos eólicos capazes de extrair o máximo potencial desse recurso limpo e renovável. Para isso, os parques eólicos são classificados em dois tipos: *onshore* e *offshore*.

## 2.9 Aplicações dos sistemas eólicos

Um sistema eólico para abastecimento de cargas pode-se utilizar três aplicações distintas: sistemas autônomos ou isolados, híbridos e interligados à rede. Na imagem 67, podemos observar exemplos de cada um desses sistemas respectivamente. Estes sistemas acatam uma configuração básica com unidade de controle de potência e, em alguns casos, de uma unidade de armazenamento.

Figura 67 - Aplicações dos sistemas eólicos quanto ao tamanho dos aerogeradores



Fonte: MONTEZANO, 2007.

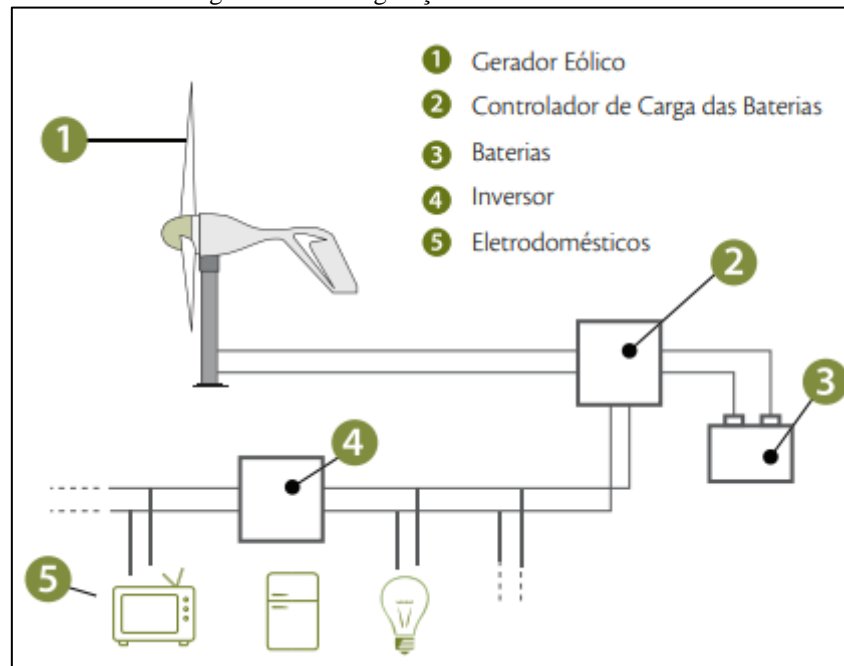
### 2.9.1 Sistemas autônomos ou isolados

Estes sistemas basicamente necessitam de uma unidade de geração, consumo e armazenamento. Este armazenamento pode ser feito através de baterias, com o objetivo de utilizar aparelhos elétricos, ou na forma de energia gravitacional, com a finalidade de armazenar a água bombeada em reservatórios para posterior utilização.

Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, como no caso dos sistemas para irrigação onde toda a água bombeada é diretamente consumida. Para os sistemas que utilizam baterias, é necessário um dispositivo controlador de carga para evitar danos às baterias provocados por sobrecargas ou grandes descargas. Além do controlador de carga, também é necessária a utilização de um inversor de frequência para

realizar a conexão das baterias com sistemas de corrente alternada. Observando a figura 68, temos um exemplo da configuração de um sistema eólico isolado.

Figura 68 - Configuração de um sistema eólico isolado

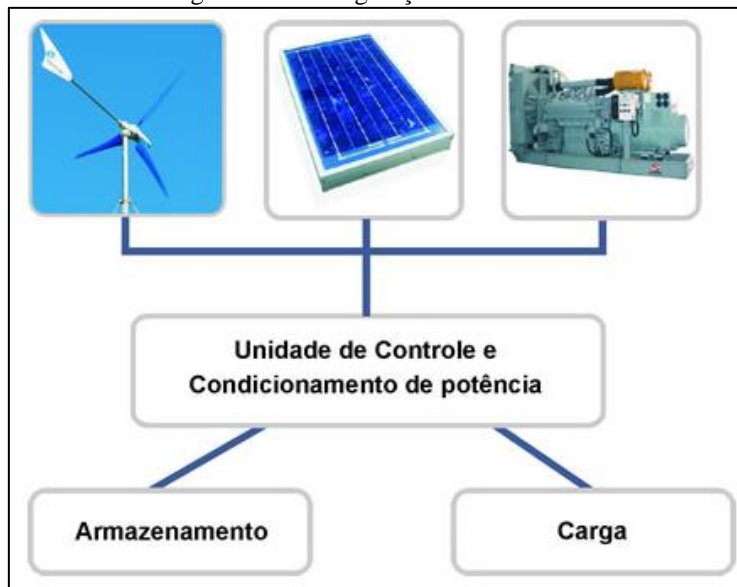


Fonte: JELARE, 2011.

### 2.9.2 Sistemas híbridos

Os sistemas híbridos são aqueles que possuem mais uma fonte de geração de energia elétrica, como, por exemplo, módulos fotovoltaicos e geradores a diesel no fornecimento de energia elétrica para cargas que não possuem nenhum tipo de ligação com a rede elétrica. São sistemas mais complexos, usualmente utilizados em aplicações de médio porte que trabalham com corrente alternada, não necessitando de um inversor de frequência. Estes necessitam de sistemas de controle para otimização do uso de cada uma das fontes. Para melhor visualização, ver figura 69, que retrata um exemplo deste modelo.

Figura 69 - Configuração de um sistema híbrido



Fonte: DUTRA, 2007.

### 2.9.3 Sistemas interligados à rede

Estes, por sua vez, possuem geração entregue diretamente à rede elétrica não sendo necessário sistemas de armazenamento de energia, precisando apenas de sistemas de sincronização com a rede elétrica. Possuem vantagens de redução de perdas e custo evitado com expansão da rede. Ver figura 70

Figura 70 - Configuração de um sistema interligado à rede – Parque Eólico da Prainha – CE



Fonte: DUTRA, 2007.

### 2.10 Medições da velocidade do vento

A medição da velocidade do vento é o ponto mais crítico para a avaliação do recurso de vento, determinação do desempenho e previsão da energia anual gerada. Em termos econômicos, erros traduzem-se diretamente em risco financeiro. Não há outro

setor em que a importância das incertezas nas medições da velocidade do vento seja tão grande como na energia eólica.

Devido à falta de experiência, muitas medições de velocidade do vento possuem incertezas inaceitavelmente altas porque não são aplicadas boas práticas na seleção, calibração e montagem dos anemômetros e na seleção do local de medição. (JELARE, 2011)

Existem dois tipos de anemômetro, o digital e o analógico de torre. Para um anemômetro analógico de torre, onde fica instalado no local, as extremidades são formadas metades ocas de esferas que o vento faz rodar. O movimento de rotação aciona uma vareta central, que está ligada a um registrador usado para marcar a velocidade do vento. (Figura 71)

Figura 71 - Anemômetro digital (a) e anemômetro analógico (b)



Fonte: do autor.

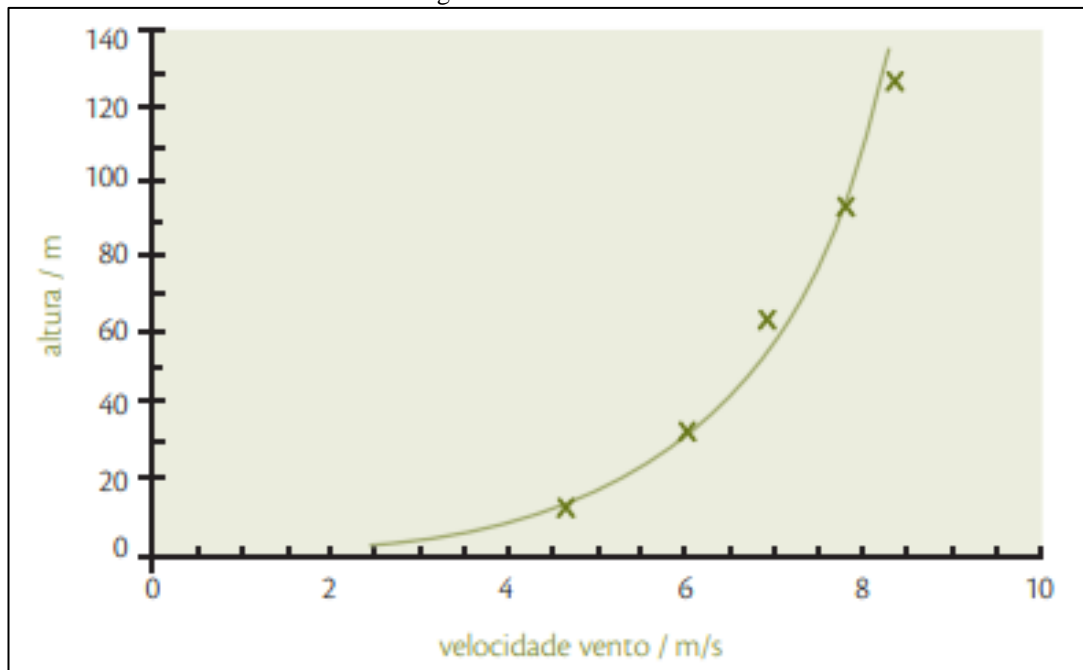
Convém destacar algumas observações importantes: (JELARE, 2011)

- O período mínimo de medições da velocidade de vento é de um ano, o que diminui significativamente o risco financeiro de um parque eólico.
- As medições de velocidade de vento são de suma importância ao se considerarem os aspectos econômicos de projetos de turbinas eólicas. Um erro de 3% nas medições leva a erros de 10% na produção de energia e, por essa razão, não é aceitável.

- A rugosidade da superfície do terreno diminui a velocidade do vento. Em alturas superiores ao nível do solo, a rugosidade influencia menos e a velocidade do vento aumenta.

A figura abaixo dá uma ideia de uma possível forma de camada limite da velocidade do vento.

Figura 72 - Velocidade/altura



Fonte: JELARE, 2011.

O sensor de direção também é um instrumento utilizado para medir a direção do vento. A direção dos ventos é importante para o cálculo da energia gerada por determinada usina eólica e para a otimização da escolha dos locais e da direção que ficarão alinhados os aerogeradores.

## 2.11 Avaliação da produção de energia elétrica

O primeiro passo em um projeto de aproveitamento de potencial eólico é uma avaliação preliminar da estimada produção de energia elétrica de uma determinada instalação eólica no local escolhido. Com base nessa avaliação, define-se a viabilidade econômica do projeto.

Considera-se então, como primeiro requisito, que é conhecida a curva que relaciona a potência gerada pela turbina eólica escolhida em função da velocidade do vento, normalmente fornecida pelo fabricante. A curva de potência de uma turbina eólica é caracterizada pelos seguintes valores do vento: (CARVALHO & NETO)



- Velocidade de entrada do vento: velocidade do vento na altura do cubo, a partir da qual a turbina eólica inicia a geração de energia elétrica;
- Velocidade nominal do vento: velocidade do vento na altura do cubo, a partir da qual a turbina eólica fornece a potência nominal;
- Velocidade de corte do vento: velocidade do vento na altura do cubo, a partir da qual a turbina eólica é retirada de operação via sistema automático de proteção por motivo de segurança.

Como segundo requisito, para cálculo da produção estimada de eletricidade, também é necessário o uso de um histograma ou diagrama de frequência de ocorrência da velocidade do vento no local da instalação, levando a partir de medições realizadas pelo anemômetro. Se o histograma da velocidade do vento é conhecido a partir de medições, uma boa estimativa da produção anual de energia pode ser calculada através da equação:

(2.10.1)

$$E_{total} = \sum f_i P_i T$$

em que T representa o período total de tempo considerado na avaliação;  $P_i$ , a potência fornecida pela curva de potência da instalação para a classe de velocidade do vento;  $f_i$  e  $v_i$ , a frequência relativa de cada classe de velocidade, sendo tal frequência fornecida por:

(2.10.2)

$$f_i = \frac{t_i}{T}$$

em que  $t_i$  é o tempo no qual foi registrada a classe de velocidade do vento  $v_i$ .

Com as variações climáticas sendo frequentes a cada período do ano, a velocidade do vento também varia seu perfil ao longo do ano. Essa variação ao longo dos anos faz com que os dados de vento sejam medidos ao longo de vários períodos (em geral, alguns anos) para que seja feita uma análise mais confiável do regime dos ventos. As grandezas estatísticas mais utilizadas na determinação do regime dos ventos são a velocidade média e o desvio padrão  $\sigma$ . (DUTRA, 2001)

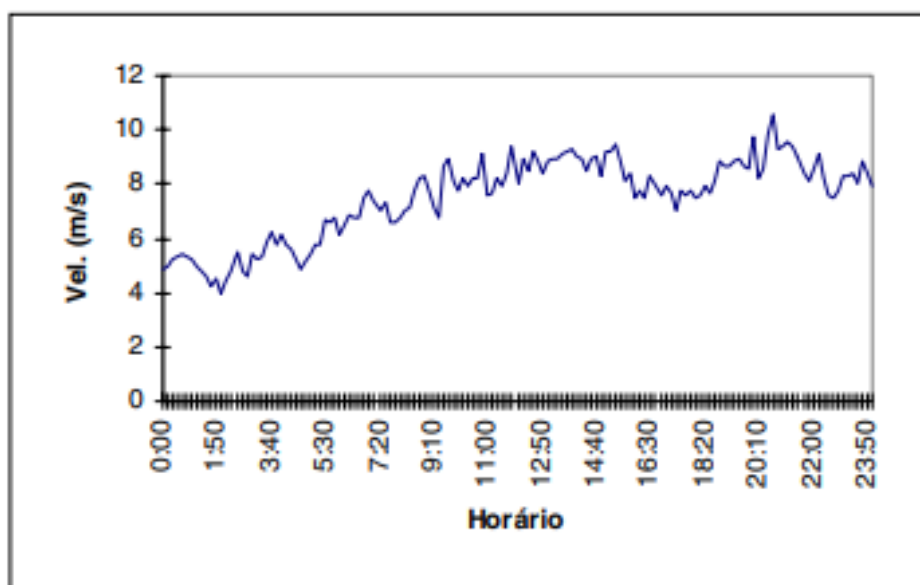
Com o objetivo de selecionar uma turbina eólica ou comparar várias regiões do país através de parâmetros estatísticos, tais como velocidade média e desvio padrão  $\sigma$ , o uso de tabelas de frequência e histogramas, torna-se um pouco prático.

Assim, é necessário que possamos armazenar os dados de uma maneira sólida possível. Na prática, os dados de vento sofrem um tratamento estatístico adequado e adota-se o procedimento de armazená-los na forma de expressões analíticas, conhecidas como distribuições de probabilidades, que fornecem a probabilidade de ocorrência de ventos com velocidade  $V$ . As distribuições de Weibull e Rayleigh são as mais utilizadas para a representação dos dados de vento nas variáveis distribuições estatísticas que temos.

### 2.11.1 Distribuições de Weibull

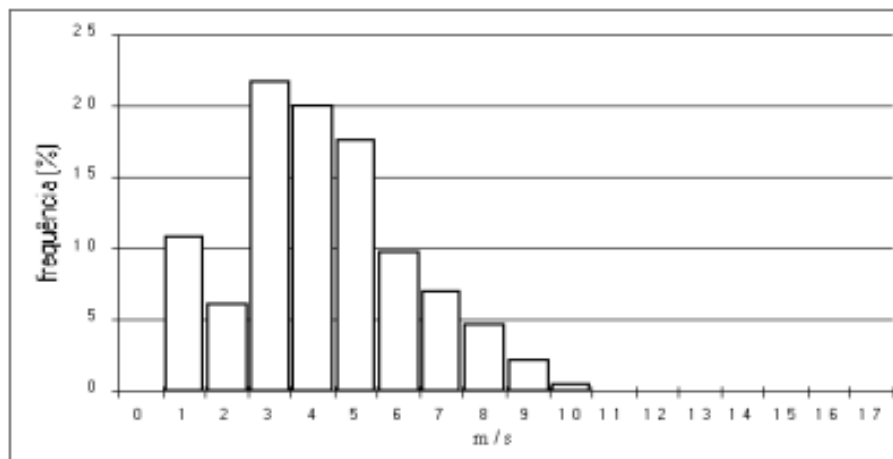
Uma vez que a intensidade dos ventos não é constante, como apresentado na figura 73, para se determinar a energia produzida pelos ventos durante um certo intervalo de tempo é necessário realizar um tratamento nos dados que os representam, de forma a estratificar as velocidades e as frequências em que eles ocorreram (histograma de velocidade). Em outras palavras, é necessário saber quantas vezes, durante o intervalo de tempo medido, ocorreram ventos de 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s e assim por diante. Um exemplo de histograma de frequência de ocorrência dos ventos é mostrado na figura 74.

Figura 73 - Atuação da velocidade do vento em função do tempo



Fonte: DUTRA, 2001.

Figura 74 - Histograma de dados do vento



Fonte: DUTRA, 2001.

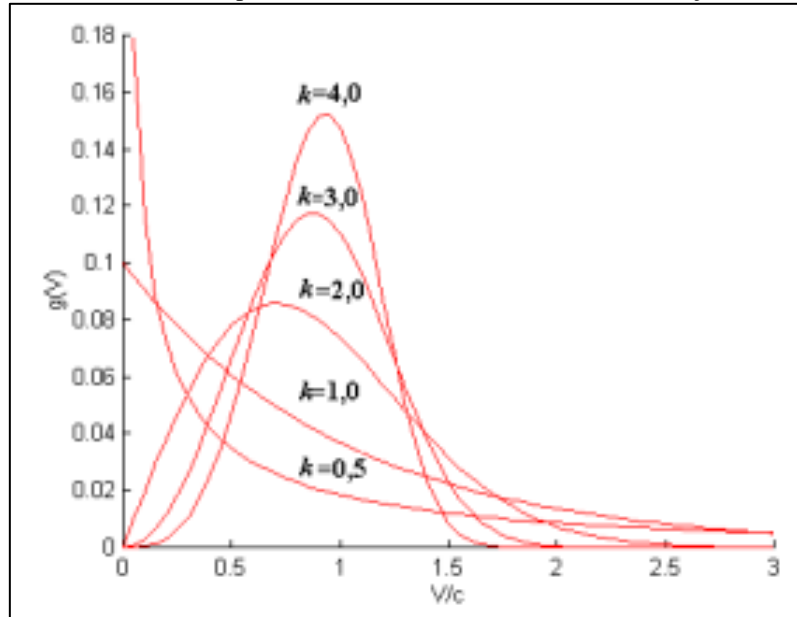
A distribuição de Weibull é o método mais utilizado para se realizar o tratamento estatístico de histogramas relativos ao comportamento dos ventos, sendo muito utilizado pela maioria dos programas computacionais que avaliam e estimam a produção de energia.

A distribuição de Weibull é normalmente representada na forma de  $k$  e  $c$ , onde  $k$  representa o fator de forma da distribuição dos ventos sendo um valor adimensional; e  $c$  representa o fator de escala que depende da velocidade média dos ventos como demonstrado na equação 2.10.1.1 e na figura 75, mostra-se a influência do parâmetro de forma  $k$  na curva de distribuição de Weibull.

(2.10.1.1.)

$$f_w = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k}$$

Figura 75 - Influência do parâmetro de forma k na curva de distribuição de Weibull



Fonte: DUTRA, 2001.

A distribuição de Weibull reduz-se à distribuição de Rayleigh quando  $k = 2$  com o parâmetro de escala assumindo o valor:

(2.10.1.2)

$$c = \frac{2 \bar{v}}{\sqrt{\pi}}$$

Vários métodos podem ser utilizados para estimar os parâmetros da distribuição de Weibull  $c$  e  $k$ , dependendo dos dados de vento disponíveis e do rigor requerido na análise. Estudos demonstram que se obtém resultados mais precisos a partir do método que utiliza a velocidade média e o desvio padrão como grandezas estatísticas as quais estão relacionadas com os parâmetros  $c$  e  $k$  através das expressões:

(2.10.1.3)

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \left(\frac{1}{k}\right)\right)} \quad e \quad k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1,086}$$

onde  $\Gamma$  é função gama do argumento:

(2.10.1.4)

$$\left(1 + \left(\frac{1}{k}\right)\right)$$

### 2.11.2 Distribuições de Rayleigh

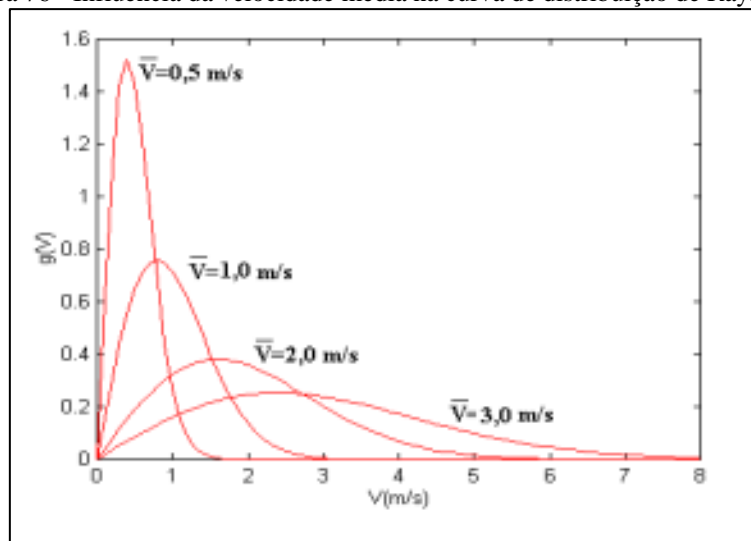
A função densidade de probabilidade de Rayleigh fica definida apenas com o conhecimento da velocidade média e representa bem os regimes de vento que apresentam velocidades moderadas (4 – 8 m/s). A função densidade de probabilidade de Rayleigh é dada pela expressão 2.10.2.1:

(2.10.2.1)

$$f_R = \frac{\pi}{v} \cdot \frac{v}{\bar{v}^2} \cdot e^{-\frac{\pi(v)}{4(\bar{v})}^2}$$

onde  $\bar{v}$  é a velocidade média do vento. A conveniência da utilização da distribuição de Rayleigh é devida a sua simplicidade. Entretanto, essa é também a responsável pelas suas limitações, uma vez que não permite representar muitas situações práticas de interesse, especialmente quando as velocidades de vento são altas. A figura 76 mostra a influência da velocidade média na curva de distribuição de Rayleigh.

Figura 76 - Influência da velocidade média na curva de distribuição de Rayleigh



Fonte: DUTRA, 2001.

### 2.12 Energia e potência extraídas do vento

A energia cinética de uma massa de ar  $m$  em movimento, com velocidade  $v$ , é dada pela equação (NETO & CARVALHO, 2012):

(2.11.1)

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

A partir da Equação (2.11.1), chega-se à potência disponível no vento, dada pela relação:

(2.11.2)

$$P_{dis} = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

Onde:

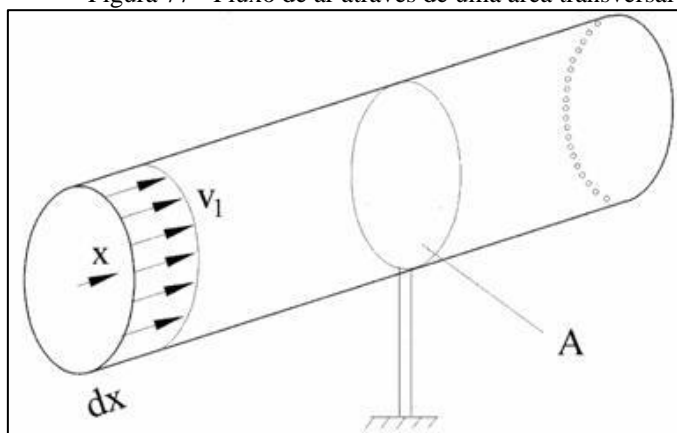
$P_{dis}$  = potência do vento [W]

$\rho$  = densidade do ar [em geral, utiliza-se o valor médio de 1,225 kg/m<sup>3</sup>]

$A$  = área da seção transversal de um tubo de corrente pelo qual escoa a velocidade  $v$  [m<sup>2</sup>]

$v$  = velocidade do vento [m/s]

Figura 77 - Fluxo de ar através de uma área transversal  $A$



Fonte: CRESESB, 2014.

A densidade de potência representa a relação entre a potência eólica disponível e a área da seção transversal:

(2.11.3)

$$D_p = \frac{P_{dis}}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3$$

Apenas uma parte dessa potência disponível pode ser utilizada por uma turbina eólica. Entende-se, no presente texto, turbina eólica como qualquer sistema que converte a energia cinética do vento em energia elétrica. Para levar em conta tal característica, é introduzido o chamado coeficiente de potência  $C_p$ , que pode ser definido como fração da

potência eólica disponível que é extraída pelas pás do rotor. Representa, portanto, um rendimento aerodinâmico.

Para determinar o valor máximo dessa parcela de energia extraída do vento, o que significa  $c_p$  máximo, o físico alemão Arbert Betz considerou um conjunto de pás em um tubo de corrente, em que  $v_1$  representa a velocidade do vento na região anteriores às pás,  $v_2$  a velocidade do vento no nível das pás e  $v_3$ , a velocidade do vento após deixar as pás

A potência retirada do vento é, neste caso,

(2.11.4)

$$P_{ret} = \frac{1}{2} \rho \frac{dm}{dt} (v_1^2 - v_3^2)$$

em que  $dm/dt$  representa o fluxo de massa de ar. Essa potência pode ser também expressa na forma:

(2.11.5)

$$P_{ret} = m \frac{dm}{dt} v_2$$

Igualando (2.11.4) e (2.11.5), isto é, considerando que a desaceleração do vento na região anterior às pás é igual à desaceleração do vento após as pás, tem-se:

(2.7.6)

$$v_2 = \frac{(v_1 + v_3)}{2}$$

nesse ponto, torna-se necessário determinar a relação entre  $v_3$  e  $v_1$ .

Dois casos extremos valem a pena ser analisados:

- a velocidade do vento não é alterada ( $v_1 = v_3$ ): nesse caso, nenhuma potência é retirada;
- a velocidade do vento é diminuída para zero ( $v_3=0$ ): nesse caso, o fluxo de massa de ar é zero, o que também faz com que nenhuma potência seja retirada.

A partir da equação (2.11.5), tem-se que:

(2.11.7)

$$P_{ret} = \rho A v_2 (v_1 - v_3) v_2$$

Substituindo (2.11.6) em (2.11.7), obtém-se:

(2.11.8)

$$P_{ret} = \rho \frac{A v_1^3}{4} [(1 + \alpha)(1 - \alpha^2)]$$

com  $\alpha = v_3/v_1$ . Por meio de diferenciação, demonstra-se que o valor máximo da potência retirada é encontrado quando  $\alpha = 1/3$ , ou seja, a potência máxima obtida por uma turbina eólica quando o vento deixa as pás do rotor com 1/3 de sua velocidade original, ou seja,  $v_3 = 1/3v_1$  e  $v_2 = 2/3v_1$ . Nesse caso, o aproveitamento máximo teórico da potência eólica disponível é a ordem de 59,3%, valor este chamado de coeficiente de potência de Betz (cp,Betz) em homenagem ao primeiro pesquisador a publicar tal valor. A potência máxima teórica, portanto, é dada por:

(2.11.9)

$$P_{Betz} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 c_{p,Betz} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \frac{16}{27}$$

Na prática, para turbinas eólicas modernas, os valores máximos para o coeficiente de potência são da ordem de 50%.

O coeficiente de potência é função da chamada velocidade específica  $\lambda$ . A velocidade específica representa a relação entre velocidade de rotação da ponta da pá,  $v_u$  e a velocidade do vento:

(2.11.10)

$$\lambda = \frac{v_u}{v}$$

Na realidade,  $\lambda$  não se trata de uma velocidade, mas de um número adimensional. A velocidade  $v_u$ , por sua vez, é definida pelo produto da velocidade angular  $\omega$  de pá e o raio da R da pá:

(2.11.11)

$$v_u = \omega R$$



A relação entre  $c_p$  e  $\lambda$  mostra que, para apenas um valor da velocidade específica, o coeficiente de potência é máximo. Assim, apenas unidades eólicas que operam em velocidade variável podem manter o valor de  $\lambda$  constante, independente da velocidade do vento, o que faz com que o coeficiente de potência permaneça em seu valor máximo.

Valores típicos para a velocidade da ponta da pá oscilam entre 50 e 150 m/s. Essa velocidade constitui importante critério para o dimensionamento da pá. Vista a relação descrita pela equação (2.11.11), instalações eólicas de grande porte apresentam baixa velocidade angular, enquanto unidades de pequeno porte possuem alta velocidade angular. Máquinas com potência na ordem de kW alcançam velocidades de cerca de 180 rpm; máquinas de MW operam com cerca de 20 rpm.



Quanto menor for o número de pás, mais rápido o rotor da instalação eólica gira. A velocidade específica é função da solidez. Neste caso, solidez é a relação entre a área varrida por elas. A relação entre  $\lambda$  e a solidez pode ser resumida da seguinte forma:




- Rotores com alto valor de  $\lambda$  possuem baixo torque na partida, baixa solidez e são empregados principalmente para geração de eletricidade. Unidades de eixo horizontal com três pás e eixo vertical do tipo Darrieus apresentam velocidade específica na faixa de 4 a 7 (coeficiente de potência entre 0,4 e 0,5)
- Rotores com baixo valor de  $\lambda$  possuem elevado torque na partida, alta solidez e são empregados principalmente para bombeamento de água. Cataventos com multipás apresentam velocidade na faixa de 1 a 2,5 (coeficiente de potência entre 0,15 e 0,3).

### 3 Projeto

Neste tópico, iremos demonstrar um sistema de iluminação pública a partir da geração de energia eólica. Ele deverá acender as luzes dos postes quando as pás do gerador começarem a girar a partir de uma massa de ar proveniente do vento atingir as mesmas. Vemos na figura 78, os equipamentos e materiais utilizados.

Figura 78 - Equipamentos e materiais utilizados

<b>Componentes</b>	<b>Descrição</b>
<p data-bbox="485 286 608 315"><b>HÉLICES</b></p> 	<p data-bbox="874 622 1107 680">Número de pás: 4 pás Diâmetro: 0,30 m</p>
<p data-bbox="419 1023 675 1052"><b>FONTE DE TENSÃO</b></p> 	<p data-bbox="1002 1086 1201 1115"><b>COMO MOTOR</b></p> <p data-bbox="874 1115 1273 1263">Tensão: 127 V Potência: 45 W Frequência: 60 Hz Polos: 4 polos Tipo de Corrente: Corrente alternada</p> <p data-bbox="995 1330 1227 1359"><b>COMO GERADOR</b></p> <p data-bbox="874 1359 1362 1449">Tensão: Varia com velocidade do vento Potência: Varia com velocidade do vento Frequência: Varia com a velocidade do vento</p>

<p style="text-align: center;"><b>MAQUETE</b></p> 	<p>1 Lousa quadro branco: 1m x 0,70m 1 Lousa de feltro: 0,60m x 0,45m 13 Unidades de papelão encadernação 4 Folhas de cartolina Fio de cobre 14x0,001m Materiais de Artesanato</p>
<p style="text-align: center;"><b>LEDS</b></p> 	<p>13 LEDES</p>
<p style="text-align: center;"><b>VENTILADOR</b></p> 	<p>Modelo: Vent Ventue Tensão: 127 V Tipo de controle: 3 velocidades Diâmetro da hélice: 0,40 m Fio de cobre 14x0,001m Materiais de Artesanato</p>

<p style="text-align: center;"><b>AMPERÍMETRO DE ALICATE</b></p> 	<p>Tensão máxima CA: 600V Tensão máxima CC: 600V Corrente máxima CA: 200 A</p>
<p style="text-align: center;"><b>VOLTÍMETRO</b></p> 	<p>Tensão máxima CA: 1000V Tensão máxima CC: 750V Corrente máxima CA: 20 A Corrente máxima CC: 20 mA Frequência máxima: 200 Hz</p>
<p style="text-align: center;"><b>ANEMÔMETRO DIGITAL</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>VELOCIDADE DO AR</b></p> <p>Faixa: 0 - 30m/s, 0 - 90km/h Precisão: +/- 5%</p> <p style="text-align: center;"><b>TEMPERATURA DO AR</b></p> <p>Precisão: mais ou menos 2 graus Celsius Termômetro: termômetro NTC Temperatura de operação: -10 A 45 graus Celsius</p> <p style="text-align: center;"><b>DIMENSÕES</b></p> <p>Tamanho do item: 105 * 40 * 18 mm Peso do item: 50g</p>

Fonte: do autor

### 3.1 Montagem do Sistema

Após a realização do dimensionamento dos componentes, foi desenvolvido uma maquete ilustrando um pequeno bairro que fora iluminado pelos leds e energizados através do gerador eólico.

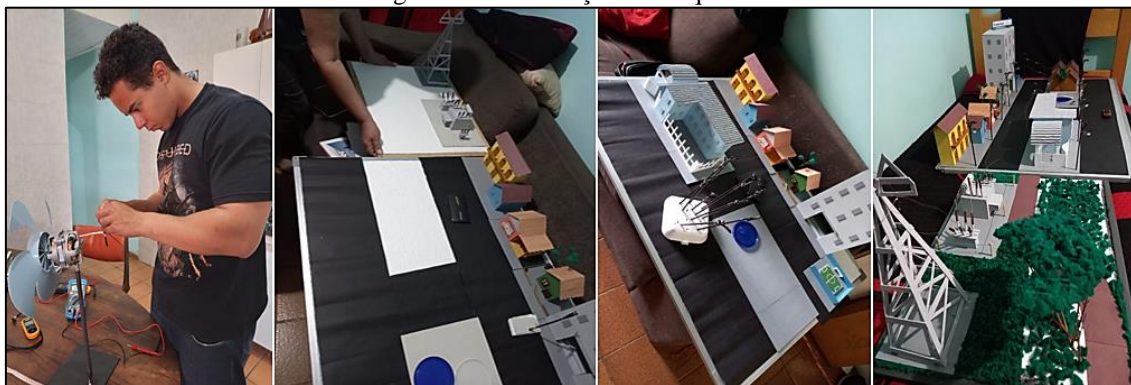
O gerador, originalmente, era um motor de ventilador que foi desmontado e alterado o número de dois para quatro polos para obter valores de tensão elétrica elevada e estável em relação a velocidade do vento alcançável com os equipamentos disponíveis.

A hélice foi acoplada no rotor do gerador prendendo-o ao suporte de ferro sustentado por uma placa de madeira. Os cabos de cobre foram conectados ao gerador

com um diodo em série e um capacitor em paralelo para que a corrente fosse retificada de CA para CC, para que a luminosidade nos LEDs ficasse estabilizada, já que com a densidade e velocidade do vento limitadas para as condições físicas e do ambiente controlado do laboratório, não foi possível produzir uma frequência de estabilidade suficiente para que o olho humano interpretasse que o LED esteja aceso.

A maquete foi confeccionada por uma artesã, orientada pelos estudantes de engenharia elétrica, que forneceram dados para a confecção dos postes, tipo e distância dos fios de cobre, quantidade de LEDs a serem acesos, e explicação do princípio de transmissão e distribuição de energia elétrica. Observemos a confecção na figura 79 a seguir.

Figura 79 - Construção da maquete

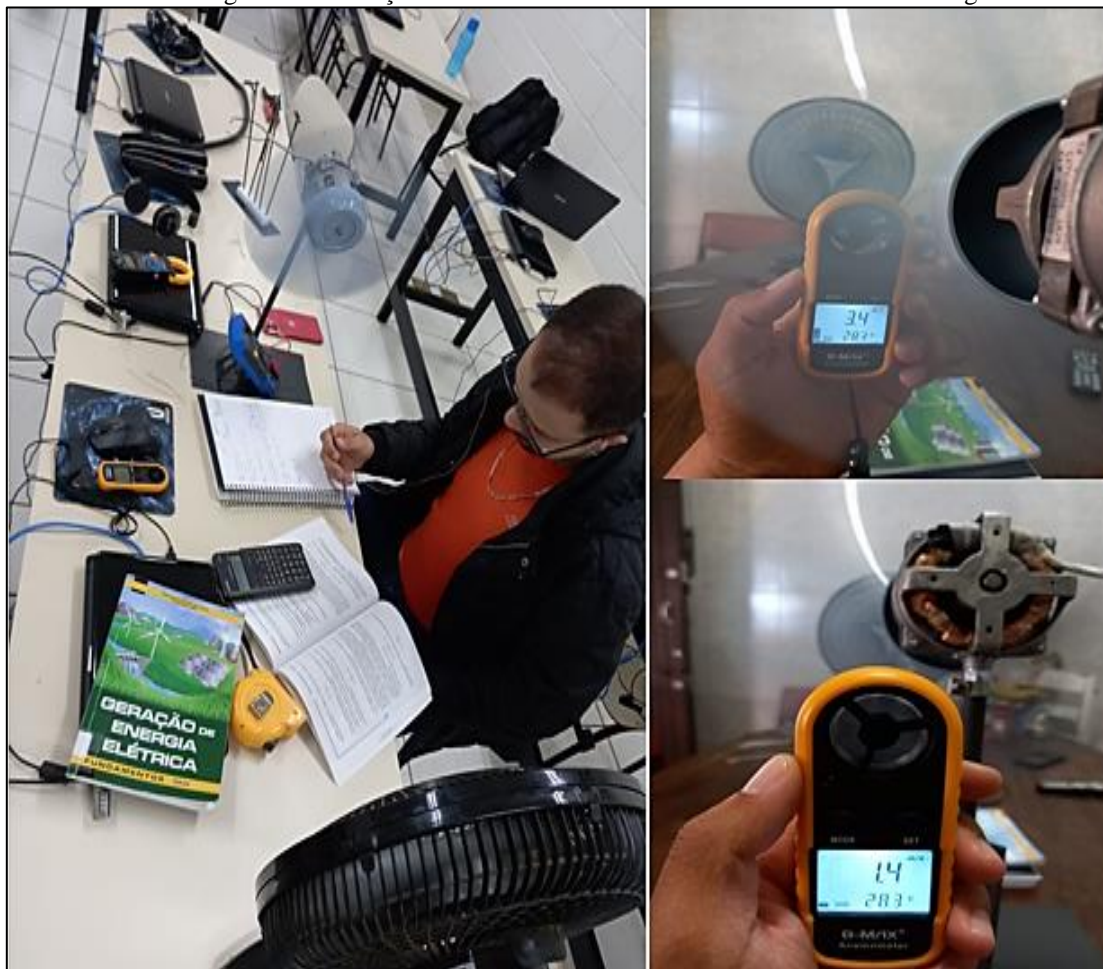


Fonte: do autor.

### 3.1.2 Testes no sistema

Após a montagem dos componentes na maquete, foi realizado testes na hélice para comprovar a teoria de Betz com a prática. Para isto, foi medido a velocidade do vento, conforme figura 80, com o anemômetro digital nas condições laboratoriais.

Figura 80 - Medições da velocidade do vento utilizando anemômetro digital



Fonte: do autor.

Com as medições, foi possível identificar que a velocidade  $V_3$ , vento posterior a hélice, é de fato, menor do que a velocidade  $V_1$ , vento anterior a hélice, ou seja, a hélice está retirando potência do vento de acordo com a teoria da Potência de Betz.

Na figura 81, demonstrando os valores obtidos através de conhecimentos já adquiridos e com equipamentos específicos como o anemômetro. Vemos também na figura 82, a equação utilizada para da distribuição de Rayleigh.

Figura 81 - Medições da velocidade do vento utilizando anemômetro digital

Grandezas	Valores obtidos
Área da circunferência (m <sup>2</sup> )	0,07068
Raio da circunferência (m)	0,15
Densidade do vento (kg/m <sup>3</sup> )*	1,225

Grandezas	Valores obtidos
Velocidade 1 (m/s)	4
Velocidade 2 (m/s)	'3
Velocidade 3 (m/s)	1
Velocidade Média (m/s)	3

\*:Valor retirado do livro de NETO & CARVALHO – Geração de energia elétrica: fundamentos, 2012

Fonte: do autor.

Figura 82 - Frequência de Rayleigh nas velocidades do vento utilizando anemômetro

Equação utilizada	Item	Fórmula
Frequência de Rayleigh	2.10.2.1	$f_R = \frac{\pi}{v} \cdot \frac{v}{v^2} \cdot e^{-\frac{\pi}{4}(\frac{v}{v})^2}$

Fonte: do autor.

Com isso, na figura 83, expressamos os resultados medidos para a frequência de Rayleigh em determinadas velocidades média.

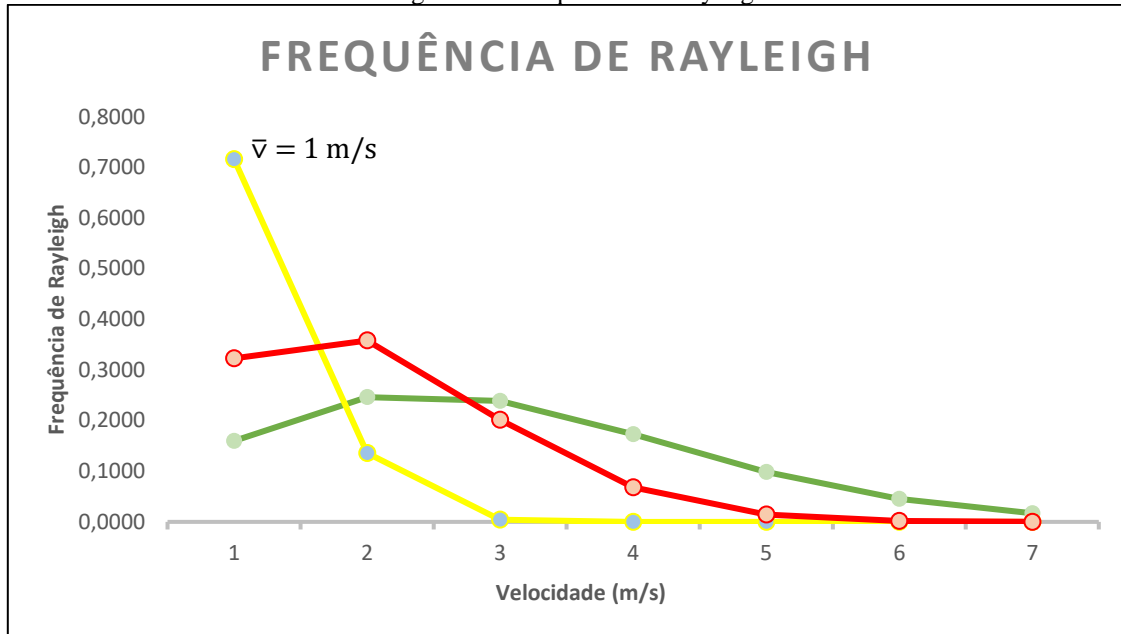
Figura 83 - Frequência de Rayleigh em determinadas velocidades média

Velocidade do Vento (m/s)	Estimativa velocidade média 1 (m/s)	Estimativa velocidade média 2 (m/s)	Velocidade média medida (m/s)	Frequência Rayleigh velocidade média 1 (%)	Frequência Rayleigh velocidade média 2 (%)	Frequência Rayleigh velocidade média medida (%)
1	1	2	3	72	32	16
2	1	2	3	14	36	25
3	1	2	3	0	20	24
4	1	2	3	0	7	17
5	1	2	3	0	1	10
6	1	2	3	0	0	5
7	1	2	3	0	0	2

Fonte: do autor.

A partir das grandezas e valores obtidos na tabela acima, demonstramos por meio da função densidade de probabilidade de Rayleigh com o conhecimento da velocidade média, representando bem o regime de vento com velocidades moderadas. A distribuição de Rayleigh, como já comentado anteriormente, é utilizado por conveniência devido a sua simplicidade para descrever o nível do sinal recebido, ou seja, da velocidade do vento (afetado por um canal com desvanecimento plano) em função da variação temporal, ou a amplitude das componentes de multipercursos individuais.

Figura 84 - Frequência de Rayleigh obtida



Fonte: do autor.

Para calcularmos a potência disponível do vento e a potência retirada do nosso projeto, usaremos na figura 85 para auxílio da obtenção dos resultados.

Figura 85 - Fórmulas para cálculos de potência

Equação utilizada	Item	Fórmula
Potência disponível no vento	2.11.1	$P_{dis} = \frac{1}{2} \rho A v^3$
Velocidade do vento na pá e velocidade média	2.11.6	$v_2 = \frac{(v_1 + v_3)}{2}$
Potência retirada	2.11.9	$P_{Betz} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 c_{p,Betz} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \frac{16}{27}$

Fonte: do autor.

Relacionando a figura 85 com os valores medidos apresentados na figura 81, conseguimos dimensionar a potência disponível do vento com a potência retirada, satisfazendo assim, o coeficiente de Betz. Veja na imagem 86, os valores obtidos.



Figura 86 - Valores de potência obtidos pelo sistema

Velocidade do Vento (m/s)	Potência Disponível (W)	Potência Retirada (W)
1	0,043	0,026
2	0,346	0,205
3	1,169	0,693
4	2,771	1,643
5	5,412	3,209
6	9,352	5,546
7	14,850	8,806
8	22,167	13,145
9	31,562	18,716
10	43,295	25,674

Fonte: do autor.

Finalmente, baseando-se em todos os cálculos acima, na construção da nossa maquete simulando um bairro, foi possível acender 13 leds representando os postes ligados ao nosso gerador como vemos na figura 87.

Figura 87 - Luzes dos leds acesas utilizando energia elétrica do gerador eolioelétrico



Fonte: do autor.

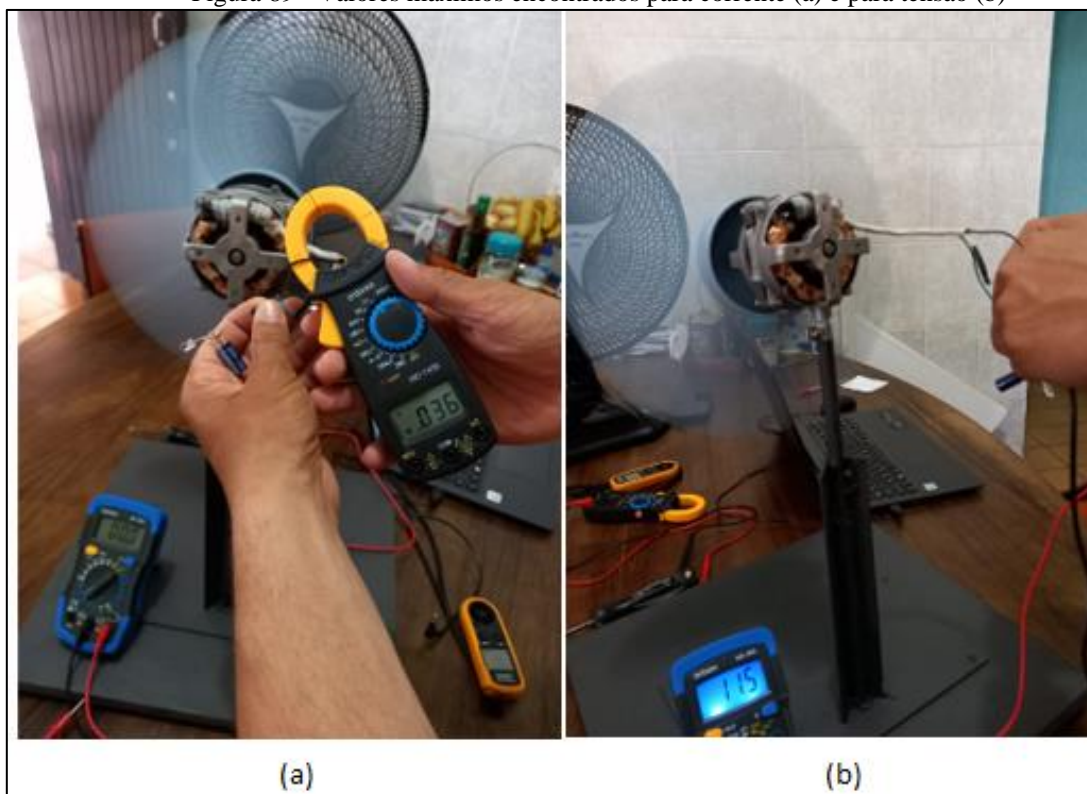
Na figura 88, demonstramos os valores encontrados para as grandezas de tensão e corrente gerados pelo gerador eolioelétrico. Posteriormente, a imagem 89, complementa os resultados desta tabela.

Figura 88 - Valores de tensão e corrente elétrica encontrados

Velocidade do Vento (m/s)	Tensão Máxima Gerada (V)	Corrente de Curto-Circuito (mA)
1,0	2,0	-
2,0	5,0	6,0
3,0	8,0	15,0
4,0	11,5	36,0

Fonte: do autor.

Figura 89 - Valores máximos encontrados para corrente (a) e para tensão (b)

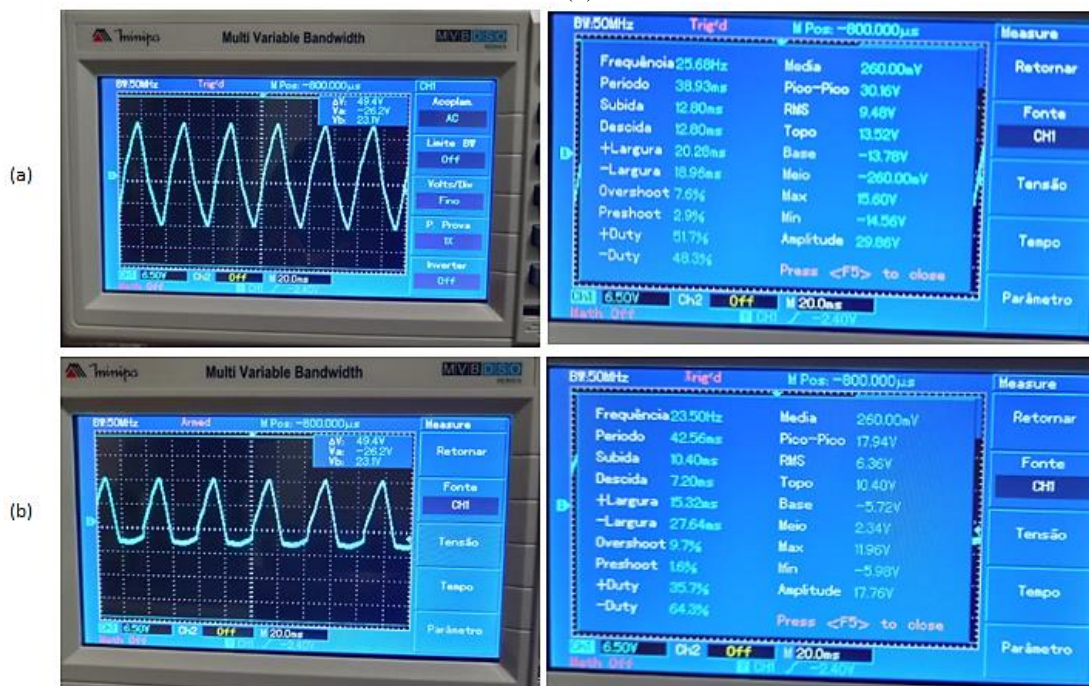


Fonte: do autor.

Quando o vento perde velocidade atrás do rotor, o ar flui em volta da área do rotor, em vez de atravessá-lo. Por isso, a máxima potência extraída do vento por uma turbina eólica apresenta uma limitação que é referente a uma velocidade do vento na saída do rotor eólico que não pode ser inferior a  $1/3$  da velocidade do vento incidente  $v$ . Então, o rotor absorve a energia equivalente a  $2/3$  da energia disponível no vento livre antes da turbina. Verificando as velocidades de vento aplicadas no sistema, conseguimos provar a teoria da potência de Betz. O limite de Betz indica que, mesmo para os melhores aproveitamentos eólicos, recupera-se um máximo de 59,3% da energia do vento.

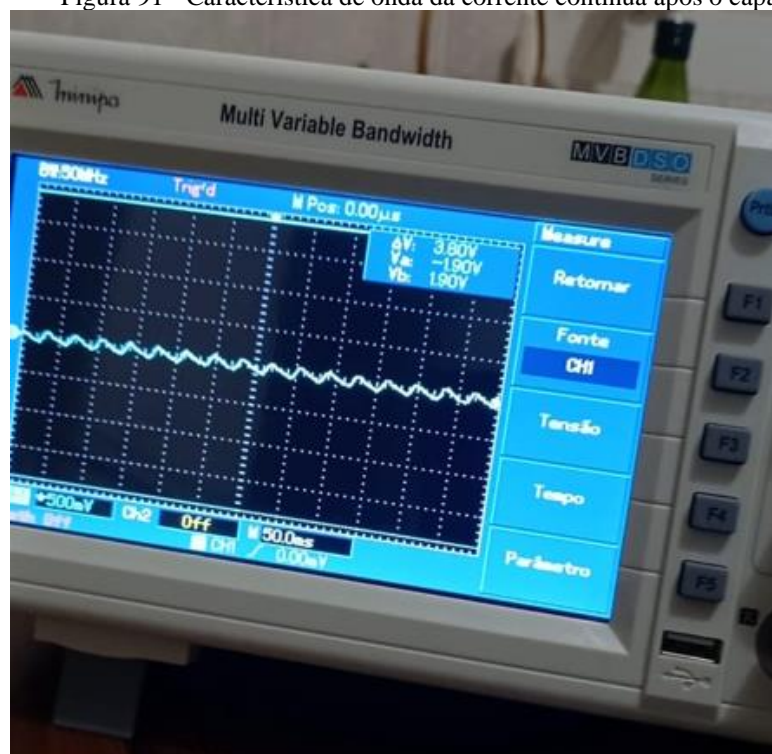
Na figura 90, com a ajuda de um osciloscópio, conseguimos demonstrar as características da forma de onda do motor (a), da forma de onda do motor após o diodo (b) e na figura 91, a característica de onda da corrente contínua após o capacitor.

Figura 90 - Características da forma de onda do motor (a), da forma de onda do motor após o diodo (b)



Fonte: do autor.

Figura 91 - Característica de onda da corrente contínua após o capacitor



Fonte: do autor.

De acordo com as informações obtidas do osciloscópio, a forma de onda analisada do aerogerador, foi uma onda triangular com tensão pico-pico de 30 V. Após a retificação do sinal de CA para um sinal de meia onda com um diodo, formou-se um sinal com tensões de pico-pico de 18 V, tendo a parte máxima da onda com 12 V. Após isto, foi

conectado um capacitor de 16 V com 3300  $\mu\text{F}$  como filtro para que o sinal formado se aproxime o máximo da tensão de pico para obter uma tensão de corrente contínua.

## 4 Conclusão

Diante dos resultados apresentados, foi possível demonstrar que o gerador eolioelétrico é capaz de transformar energia cinética do vento em energia mecânica de rotação. Ao converter a energia cinética do vento, a turbina eólica reduzirá a velocidade do vento na saída do rotor, o que resultará no aumento do diâmetro do tubo de vazões.

A crise atual pode acelerar a implantação de energia renovável mais limpa e sustentável, como eólica e solar, assim como os choques do petróleo da década de 1970 e 1979 estimularam grandes avanços na eficiência energética, bem como na energia nuclear, solar e eólica. A crise também ressaltou a importância de investir em infraestrutura robusta de redes de gás e energia para integrar melhor os mercados regionais.

Os mercados de energia começaram a apertar em 2021 por causa de uma variedade de fatores, incluindo a recuperação econômica extraordinariamente rápida após a pandemia. Mas a situação se transformou dramaticamente em uma crise energética global completa após a invasão da Ucrânia pela Rússia em fevereiro de 2022. O preço do gás natural atingiu níveis recordes e, como resultado, o mesmo aconteceu com a eletricidade em alguns mercados. Os preços do petróleo atingiram seu nível mais alto desde 2008.

A invasão provocou uma reavaliação das políticas e prioridades energéticas, pondo em causa a viabilidade de décadas de decisões de infraestruturas e de investimento e reorientando profundamente o comércio internacional de energia.

Compreender as oportunidades, os desafios e a viabilidade que acompanham as diferentes tecnologias de energia limpa, novas e emergentes, são fundamentais para melhorar a formulação de políticas energéticas e ambientais. As novas tecnologias de baixo carbono mostram um claro potencial para transformar o sistema energético global, mas um desafio fundamental permanece: que medidas os governos e a indústria precisam tomar para garantir seu desenvolvimento e implantação?

Os recursos advindos da redução dos subsídios aos combustíveis fósseis devem ser redirecionados para novas tecnologias, limpas e eficientes, direcionando investimentos, incentivando novas tecnologias de geração e armazenamento de energia

limpa a exemplo da geração de energia eólica. Sendo assim, a geração eolioelétrica possui os benefícios e características necessárias para ser um dos mais promissores para esse tipo de aplicação.

O desenvolvimento do projeto foi de absoluto sucesso, podendo demonstrar casos e aplicações, como o desenvolvimento de uma unidade que serviu de protótipo para demonstração de amostras de geração de energia através do sistema. O trabalho nos permitiu ampliar o conhecimento e aprofundar os estudos em relação à energia renovável eólica e seus benefícios, nos proporcionando um desenvolvimento em conjunto de um protótipo de sua aplicação.

## 5 Referência Bibliográfica

ABEEÓLICA (2021). **Boletim Anal de Geração Eólica 2021**. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>>. Acesso em: 3 nov. 2022. (ABEEÓLICA, 2021)

\_\_\_\_\_. (2022a). **Infovento 27**. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>>. Acesso em: 3 nov. 2022. (ABEEÓLICA, 2022a).

\_\_\_\_\_. (2022b). **Infovento 28**. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>>. Acesso em: 3 nov. 2022. (ABEEÓLICA, 2022b)

\_\_\_\_\_. (2022c). **Infovento Offshore 01**. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>>. Acesso em: 3 nov. 2022. (ABEEÓLICA, 2022c)

\_\_\_\_\_. (2022d). **O setor**. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/energia-eolica/o-setor/>>. Acesso em: 15 nov. 2022. (ABEEÓLICA, 2022d)

Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica. 3. ed. – Brasília : Aneel, 2008. 236 p. : il. ISBN: 978-85-87491-10-7 1. Energia elétrica. 2. Potencial energético. 3. Setor elétrico. 4. Atlas. 5. Brasil. I. Título.

AMARANTE, O.A.C. do, SCHULTZ, D.J., Wind Energy Resource Map of the State of Paraná, Brazil. Dewi Magazin, Germany, n. 15, p. 70-75, Aug. 1999

Ambrosio, D' Marco, Medaglia, Marco - Vertical Axis Wind Turbines: History, Technology and Applications Master thesis in Energy Engineering – May 2010 – Acesso em 08 nov. 2022.

Barbosa, Robson. Inserção da energia eólica offshore no Brasil: análise de experiências regulatórias. / Robson Barbosa; orientador: Ildo Luís Sauer- São Paulo, 2018. 281 f.: il. 30 cm

BEN – Balanço Energético Nacional, Relatório Síntese Nacional, 2022

Biodiselbr – PróAlcool – Programa Brasileiro de Álcool, 2012 – Acesso em 14 jan. 2023.

Brasil. Ministério de Minas e Energia. Matriz Energética Nacional 2030 / Ministério de Minas Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética . \_ Brasília : MME : EPE, 2007. p. 254 : il. 1. Energia elétrica – Brasil. 2. Matriz energética. I. Empresa energética. II. Título.

BUNDESVERBAND WINDENERGIE e.V. – BWE, Windenergie 2000, Osnabrück: März, 2000.

BUNNEFILLE, R.. French Contribution to Wind Power Development – by EDF 1958 – 1966, Proceedings, Advanced Wind Energy Systems, Vol. 1 (published 1976), O.Ljungström, ed., Stockholm: Swedish Board of Technical Development and Swedish State Power Board, 1974 pp 1-17 to 1-22 apud DIVONE, 1994

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: Simulações 2013 / Centro de Pesquisas de Energia Elétrica-CEPEL – Rio de Janeiro: CEPEL, 2017. 50 p. il.

\_\_\_\_\_, 2001, Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Brasília: CEPEL.

COSTA, M. A. de S *et al.* Impactos Socioeconômicos, Ambientais e Tecnológicos Causados pela Instalação dos Parques Eólicos no Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia** [online], v. 34, ed. 3, p. 399-411, 21 out. 2019. DOI <<https://doi.org/10.1590/0102-7786343049> >. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbmet/a/ZJdVgpy7gGQtq8p6YDvTWQf/?lang=pt#> >. Acesso em: 1 nov. 2022. (COSTA et al, 2019)

CRESESB. Mecanismo de Geração dos Ventos. 2014. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=211](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=211) Acesso em: 14/11/2022.

CURI, A. Z. **Impactos ambientais e econômicos da geração de energia eólica no Brasil**. São Paulo: [s.n.], 2022. Disponível em: <[https://epbr.com.br/wp-content/uploads/2021/02/ABEEolica\\_GO-Associados-V.-Final.pdf](https://epbr.com.br/wp-content/uploads/2021/02/ABEEolica_GO-Associados-V.-Final.pdf) >. Acesso em: 9 nov. 2022. (CURI, 2022)

DALMASES, F. B. i. As turbinas eólicas que desmatam a Amazônia. El país, Sharamentsa, 24 nov. 2022. Disponível em: <https://brasil.elpais.com/economia/2021-11-24/as-turbinas-eolicas-que-desmatam-a-amazonia.html>. Acesso em: 2 jan. 2023.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE Ano de acesso. **ABCDEnergia**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/ABCDEnergia>. Acesso em: 10 nov 2022.

DEUTSCHES WINDENERGIE INSTITUT. Environmental Aspects and Acceptance of Wind Energy, In: ELDORADO Summer School. Wilhelmshavenm, 1996

DUTRA, R. M., 2001. Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro. Dissertação de M. Sc., Programa de Planejamento Energético/ COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_, 2007. Energia Eólica - Princípios e Tecnologias

FILHO, Antonio Carlos de Lima. **Considerações sobre o Avanço da Energia Eólica**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 04, Ed. 10, Vol. 13, pp. 111-127. Outubro de 2019. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/avanco-da-energia>. Acessado em 29 out. 2022

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **GWEC | Global wind report 2022**. Bruxelas: [s. n.], 2022. Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2022/>. Acesso em: 1 nov. 2022. (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2022)

IEA (2022), World Energy Outlook 2022, IEA, Paris <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>>, License: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A) – Acesso 10 nov. 2022

IBERDROLA, 2022, Energia Renovável <[www.iberdrola.com](http://www.iberdrola.com)> Acessado em 15 nov. 2022.

INSTITUTO TOTEM - [I-REC \(institutototum.com.br\)](http://www.institutototum.com.br) Acessado em 25 nov. 2022

IRENA. **World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway**. Abu Dhabi: Energy Agency, 2022. ISBN 978-92-9260-429-5. Disponível em: <<http://www.irena.org/publications>>. Acesso em: 3 nov. 2022. (IRENA, 2022)

Jakub Bukala, Krzysztof Damaziak, Krzysztof Kroszczynski, Jerzy Malachowski, Tomasz Szafranski, Michal Tomaszewski, Hamid R. Karimi, Krzysztof Jozwik, Maciej Karczewski and Krzysztof Sobczak Submitted: November 9th, 2015 Reviewed: March 3rd, 2016 Published: July 27th, 2016 – Acesso em 20 nov 2022.

JELARE - Consórcio de Universidades Europeias e Latino-Americanas em Energias Renováveis, Energia renovável – Energia eólica, 2011

KEITH, D. W.; MILLER, L. M. Climatic Impacts of Wind Power. Joule, [online], v. 2, n. 12, p. 2618-2632, 19 dez. 2018. DOI <<https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.09.009>>. Disponível em:<[https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351\(18\)30446-X?returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS254243511830446X%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(18)30446-X?returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS254243511830446X%3Fshowall%3Dtrue)>. Acesso em: 10 nov. 2022. (KEITH e MILLER, 2018)



Macedo, Luziene Dantas de 1973- Produção de energia elétrica por fonte eólica no Brasil e aspectos de impacto na região Nordeste e Rio Grande do Norte / Luziene Dantas de M - Campinas, SP: [s.n.j, 2015]

MARTINS, F. R. et al. O mercado brasileiro da energia eólica, impactos sociais e ambientais. **Revista Ambiente & Água** [online]. 2017, v. 12, n. 6, pp. 1082-1100. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2064>. Acesso em: 2 jan. 2023.

MATIAS, Átila. "Ventos"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/geografia/vento.htm>. Acesso em 06 de novembro de 2022.

MEIRELES, A. J. de A. Danos socioambientais originados pelas usinas eólicas nos campos de dunas do Nordeste brasileiro e critérios para definição de alternativas locais. *Confins* [Online], 11 | 2011, online em 26 de março de 2011. Disponível em: <http://journals.openedition.org/confins/6970>. Acesso em: 2 jan. 2023.

MELO, Isabela Esterminio de. As crises do petróleo e seus impactos sobre a inflação no Brasil, 2008 – PUC-RIO, Faculdade de economia.

[Microsoft Word - tese final \(puc-rio.br\)](#), utilizado em 2.7.2.2 – Eixo Horizontal. Acessado em 09 nov. 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional 2022 \_\_\_\_\_., 2009, PROINFA Programa de incentivo às Fontes Alternativas de energia elétrica. Ministério de Minas e Energia.

MONTEZANO, B. E. M., 2007. Modelo Dinâmico de Visualização de um Aerogerador com Velocidade de Rotação Variável e Controle de Passo em VRML. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, UFRJ, Rio de Janeiro, Brazil, 137 pp.

NETO & CARVALHO, Manuel Rangel Borges, Paulo Cesar Marques – Geração de energia elétrica: fundamentos – 1. Ed. São Paulo: Érica, 2012

Oliveira Neto, Calisto Rocha de. - Energia Eólica e Desenvolvimento no Terceiro Milênio: reflexões a partir do Brasil, Nordeste e Rio Grande do Norte / Calisto Rocha de Oliveira Neto. - Natal, RN, 2016. 159 f

REIS, Pedro. A verdade sobre a morte de aves por colisão com turbinas eólicas. **Portal energia: Energias renováveis**, [S. l.], 13 fev. 2019. Disponível em:

<<https://www.portal-energia.com/verdade-sobre-morte-de-aves-por-colisao-com-turbinas-eolicas/>>. Acesso em: 2 jan. 2023.

RIGHTER, Robert W. Wind Energy in America - A History. 1996. P. 44. University of Oklahoma Press: Norman and London. Disponível em:. Acessado em: 15.set.2

SEEG - Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, Observatório do Clima < <http://seeg.eco.br> >. acessado em 1 nov. 2022.

SHEPHERD, D.G. Historical Development of the Windmill. In: SPERA, S.A. Wind Turbine Technology – Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering, New York, : ASME Press, 1994. p. 1-46

Silva, Juliane Kayse Albuquerque da. Caracterização do vento e estimativa do potencial cólico para a região de tabuleiros costeiros (Pilar, Alagoas) / Juliane Kayse Albuquerque da Silva. - Maceió, 2007. xii, 64 f. : graf., tabs.

Soares Filho, Dário Conceição Análise de projetos de montagem de turbinas eólicas / Dário Conceição Soares Filho. - 2017. 79 f. : il. color.

TERCIOTE, Ricardo. A energia eólica e o meio ambiente. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022002000100002&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100002&lng=en&nrm=abn)>. Acesso em: 02 jan. 2023.

The Scottish Engineering Hall of Fame is administered by The Institution of Engineers in Scotland, 105 West George Street, Glasgow, Scotland, G2 1QL, Registered in Scotland · Company No. SC000358 · Scottish Charity SC011583 – Acesso em 13 nov. 2022.

Vertical SANDIA, 2006, Vertical Axis Wind Turbine: The History of the DOE Program. Disponível na INTERNET via [http://www.sandia.gov/Renewable\\_Energy/wind\\_energy/topical.htm](http://www.sandia.gov/Renewable_Energy/wind_energy/topical.htm). Arquivo consultado em novembro, 2022