



Artigo

# Análise técnica sobre as características gerais dos parques eólicos do RN

Gabriel Luiz D. L. Nogueira <sup>[1]</sup> e Daniel Carlos de C. Crisóstomo <sup>[2]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; gabrieldantas503@gmail.com

<sup>[2]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; daniel.crisostomo@ufersa.edu.br

Recebido: 22/06/2021;

Aceito: 15/08/2021;

Publicado: 06/12/2021.

**Resumo:** O Brasil possui grande potencial eólico, em especial o Rio Grande do Norte (RN), que é, atualmente, o estado com maior potência eólica instalada no país, atraindo investidores todos os anos para implementação de novos empreendimentos. Este artigo aborda as principais características que permeiam os parques e aerogeradores do RN, buscando traçar aspectos da evolução da potência eólica instalada, quantidade de turbinas por parque, potência por aerogerador, altura da torre, diâmetro do rotor, distribuição da potência por região de concentração dos empreendimentos, fabricantes e tipologia das máquinas. Para a reunião destas informações, foram coletados dados dos sistemas de informação de geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e ePowerBay, do qual determinou-se também os tipos de máquinas dos modelos comerciais de aerogerador no estado. Estes dados foram analisados e discutidos por meio de tabelas e gráficos estatísticos. Pôde-se concluir, por fim, a importância da determinação do perfil dos parques do RN como guia informativo sobre o panorama geral do setor eólico no estado, para sua utilização como base de pesquisa para aprofundamento sobre os parâmetros analisados dos parques e aerogeradores, além da aplicabilidade da metodologia para outros estados ou regiões.

**Palavras-chave:** energia eólica; Rio Grande do Norte; aerogeradores; parques eólicos.

**Abstract:** Brazil has a huge wind potential, especially in the Rio Grande do Norte (RN), that is, at the moment, the state with the highest wind energy capacity installed in the country, approaching investors every year for new wind projects implementation. This article approaches the main features that go through of the wind farms and wind turbines of RN, seeking to trace aspects about the installed wind power, number of wind turbines by wind farm, turbine power, tower height, rotor diameter, energy distribution by region of concentration of wind enterprises, manufacturers and wind turbine typology. For this information's gathering, data were collected from the generation information systems of National Agency of Electric Energy (ANEEL) and ePowerBay, which was also possible to determine the wind turbines typology of commercial turbines model in the state. These data were analyzed and discussed using statistical tables and graphs. It was possible to conclude, in this way, the importance of setting down the profile of wind farms in RN as an informative guide about the general panorama of wind industry in state, for use as a research base to deepen the analyzed parameters of wind farms and wind turbines, in addition to the applicability of this research methodology to other states and regions.

**Key-words:** wind energy; Rio Grande do Norte; wind turbines; wind farms.

## 1. INTRODUÇÃO

O aquecimento global tem se intensificado nos últimos anos, constituindo um dos principais questionamentos dentro da sociedade sobre o futuro [1] (p. 207). As consequências do efeito estufa estimularam, países desenvolvidos a reduzir o uso de energias não renováveis e investir no uso de fontes de energia limpa que, apesar de mais caras, são mais seguras e emitem uma quantidade consideravelmente menor de gases nocivos na atmosfera [2]. O vento é uma destas fontes de energia limpa. Devido às diferenças de pressão e temperatura presentes na atmosfera e produzidas a partir da radiação solar, massas de ar são deslocadas e o vento é gerado.

O aerogerador, principal componente de aproveitamento da energia dos ventos, é responsável pela conversão da energia cinética associada aos deslocamentos de massas de ar em energia elétrica. Estes, evoluíram com o desenvolvimento tecnológico ao longo dos anos, que se converge a modelos comercialmente restritos, em sua grande maioria, a turbinas de eixo horizontal e de três pás [3] (p. 26). Esses modelos de aerogeradores, utilizados comercialmente em larga escala, possuem diferentes tipologias que se adequam à região conforme as especificidades do vento e geografia locais.

No cenário brasileiro, a energia elétrica do país, devido à sua geografia, é predominantemente composta por energia hidráulica. Os primeiros registros das fontes de energia renováveis não convencionais como a energia eólica e solar no Brasil datam da década de 1990. De acordo com [4] (p. 4) na matriz elétrica brasileira em 1973, a energia hidráulica representava 89,4% do total, seguida do Óleo (7,2%), Carvão (1,7%) e outras (fontes alternativas como energia eólica, biomassa, etc.) (1,7%). Atualmente (2021), entretanto, segundo [5], a matriz elétrica brasileira representa 62,42% do total, seguida da energia eólica (10,13%) e biomassa (8,72%). A energia solar (também constado como uma fonte alternativa de energia) representa 1,88% do total [5].

É notório, dessa forma, a evolução da matriz elétrica brasileira em mais de 40 anos, onde houve aumentos significativos na participação de fontes alternativas de energia. Em especial a energia eólica, que obteve crescimentos notáveis, principalmente no Nordeste, que é, segundo [6] (p. 44), a região com maior potencial eólico no Brasil (143,5 GW a uma altura de 50 m).

O RN, atualmente representa a maior potência eólica instalada do país. Possui 174 empreendimentos eólicos instalados com 2.284 aerogeradores que, juntos, somam quase 5 GW [5]. Diante disso, surge o questionamento acerca das principais características relacionadas aos parques eólicos e aerogeradores do estado. Características dos parques quanto a sua potência total instalada e região de concentração, quantidade de turbinas por parque e sua potência nominal, como ocorreu a evolução dos parques e turbinas ao longo dos anos, as características do diâmetro do rotor, altura da torre, tipologia e fabricantes. Características estas que definem o de forma geral o perfil das turbinas e parques eólicos do estado com a maior potência eólica instalada no Brasil.

## 2. AEROGERADORES E PARQUES EÓLICOS

Nesta seção serão discutidos os principais conceitos sobre parques eólicos e os aerogeradores, com o enfoque, deste último nas principais tipologias de máquinas encontradas na literatura.

### 3.1. Aerogeradores

De acordo com [7] (p. 2), aerogeradores são geradores elétricos que convertem a energia mecânica produzida pelo rotor em energia elétrica, sendo este rotacionado, basicamente, a partir da força dos ventos. As turbinas mais utilizadas para a geração de eletricidade são as turbinas de eixo horizontal do tipo hélice, de três pás. Conforme [6] (p. 14), a energia que é convertida em energia elétrica útil para consumo rede é dada pela Equação 1.

$$P_T = \frac{1}{2} \delta A w^3 C_p \eta \quad (1)$$

Em que  $P_T$  é a potência absorvida pela turbina,  $\delta$  é a densidade do ar,  $A$  é a área da região no qual o vento está passando,  $w$  a velocidade do vento,  $C_p$  é o coeficiente de performance, representa a quantidade de energia do vento que é coletada pela turbina — coeficiente que, segundo [8] (p. 24), possui um limite máximo de 59,3% (limite de Betz) — e por fim,  $\eta$  é a eficiência do conjunto gerador/transmissão.

É possível notar que a potência da turbina é proporcional ao cubo da velocidade do vento, sendo este o principal parâmetro na conversão de energia eletromecânica do aerogerador. A Figura 1 [8] (p. 33), mostra a curva de potência típica de uma turbina eólica em função da velocidade do vento.

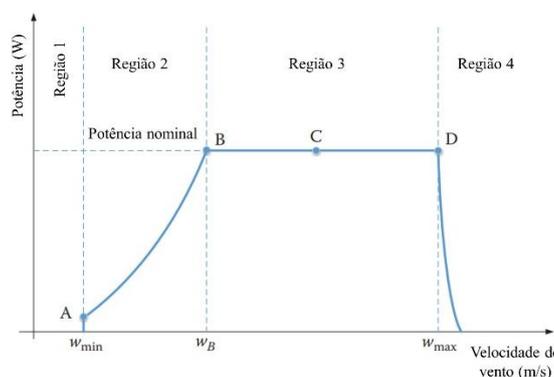


FIGURA 1. Curva característica da potência de uma turbina eólica (Adaptado de [8] (p. 33)).

Segundo [8] (p. 32), na região 1, a velocidade do vento é muito baixa para girar o rotor e gerar eletricidade, geralmente abaixo de 2,5 m/s. Na região 2, a potência da turbina é proporcional ao cubo da velocidade do vento, conforme a Equação 1. Na região 3, a velocidade permanece constante, devido às características construtivas do aerogerador, que possui sistemas de controle que limitam a potência máxima gerador, para fins de proteção do equipamento. Na região 4, para ventos com velocidade muito elevadas (superiores a 25 m/s, geralmente), é ativado o sistema de proteção, no qual a rotação das pás é reduzida e a turbina é desligada [6] (p. 14).

### 3.1.1. Tipos de aerogeradores

A Figura 2 mostra as principais configurações de turbinas eólicas encontradas na literatura, e também as mais utilizadas para disposição dos modelos de aerogeradores comercializados. Na Figura 2a [9] (p. 67) é mostrado o esquemático das turbinas do tipo I, com os principais componentes que fazem parte da estrutura, também denominadas de turbina de velocidade fixa, consistem na configuração mais simples em termos de estrutura e de sistemas de controle de velocidade do vento [10] (p. 173). Segundo [8] (p. 179), este modelo geralmente utiliza um gerador de indução do tipo gaiola de esquilo em sua composição, sendo pouco utilizado atualmente.

A caixa de engrenagens é o componente mecânico que eleva a velocidade de rotação fornecida ao gerador. De acordo com [11] (p. 196), a frequência do gerador depende do número de polos do estator e da velocidade de rotação do rotor. A velocidade de rotação das hélices varia, geralmente, de 6 a 25 rpm, entretanto, para fornecer a frequência necessária para a rede, o gerador precisa operar a uma velocidade muito maior. Comumente são utilizados geradores de 4, 6 ou 8 polos, então para que seja fornecida à rede uma frequência de 60 Hz, um gerador de 8 polos necessitaria de uma caixa de engrenagens que multiplicasse a velocidade das hélices para 900 rpm, por exemplo. Quão maior a exigência do gerador da caixa de engrenagens para aumento da velocidade do rotor, mais robusto é o seu tamanho, peso e necessidade de constantes manutenções [10] (p. 175).

O soft-starter é o componente utilizado para controlar a tensão gerada a partir das instabilidades do vento, mantendo a velocidade do gerador fixa de acordo com as condições favoráveis do vento, modificando a sua forma de onda e reduzindo efetivamente a corrente excessiva no estator durante o acionamento do sistema. O compensador é o fornecedor de potência reativa do sistema, necessário para o funcionamento adequado do gerador, no qual geralmente é utilizado um banco de capacitores. Por fim, um transformador é inserido no sistema para elevar a tensão do gerador e ajustar a tensão à da rede [10] (p. 176).

A Figura 2b [9] (p. 67) mostra o esquemático das turbinas do tipo II, também conhecidas por geradores de indução com velocidade variável. São semelhantes às turbinas do tipo I, com a exceção do gerador, que é de rotor bobinado, permitindo ser acessado externamente. O acesso ao rotor possibilita o gerador conectado a um sistema de chaveamento transistorizado para o controle do fluxo de corrente no rotor de acordo com a velocidade do vento, permitindo o gerador operar em diferentes limites de velocidade. Neste caso, quando a velocidade do vento é favorável, o rotor tem seu limite de rotação elevado, e, quando o vento é menos favorável, o limite é reduzido, fazendo com que o processo de aproveitamento do vento seja mais eficiente [8].

A Figura 2c [9] (p. 68) mostra o esquemático das turbinas do tipo III ou geradores de indução duplamente alimentado. Seu funcionamento é similar ao tipo II, com a diferença de que podem operar em um faixa contínua de valores, permitindo, desta forma, um melhor aproveitamento da energia do vento. Dispensa o uso do compensador capacitivo e do soft-starter e em seus lugares um conversor eletrônico ligado ao rotor do gerador e ao transformador é utilizado. O gerador é conectado à rede ao conversor — que injeta potência diretamente ao rotor — quanto à rede, e, por isso, recebe o nome de duplamente alimentado. Estes conversores permitem o controle de variáveis cruciais como o torque gerado, velocidade de rotação do rotor, fluxo de potência reativa e fator de potência nos terminais do estator, faixa de operação da velocidade do vento, entre outros [8].

A Figura 2d [9] (p. 69) mostra o esquemático das turbinas do tipo IV e consistem na única configuração que utiliza geradores síncronos dispensando a caixa de engrenagens. A ausência da caixa de engrenagens é importante para a redução dos custos de instalação e manutenção. Esta ausência é compensada com o uso de um gerador com grande número de polos, uma vez que a frequência do gerador é proporcional ao número de polos e à velocidade de rotação do rotor. Nesta tipologia, o gerador é conectado a um conversor, semelhante ao tipo III, que permite o controle das variáveis cruciais do sistema [10].

De acordo com [8] (p. 257), comumente estes geradores possuem um número de polos superior a 100, fazendo com que possua uma maior largura e custo quando comparados aos demais modelos. Em parques eólicos *offshore* por exemplo, o uso de geradores síncronos de ímãs permanentes é mais adequado por requererem menor frequência em manutenções, reduzindo assim, os custos com manutenções uma vez que estes parques possuem um acesso restrito na maioria dos casos [10] (p. 276).

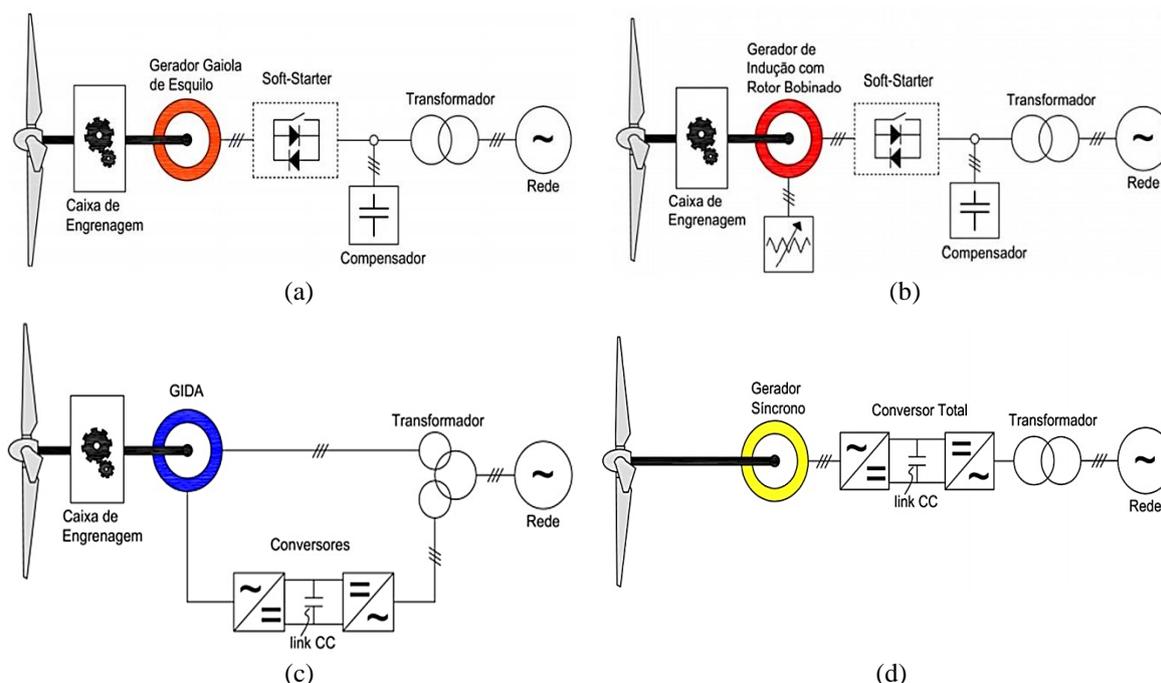


FIGURA 2. Turbina eólica do tipo: (a) I; (b) II; (c) III; (d) IV (Adaptado de [9]).

### 3.2. Parques eólicos

Os parques eólicos, consistem no conjunto de aerogeradores eletricamente interligados e se dividem em dois grupos, conforme o local de instalação: *onshore* e *offshore* [12]. Os parques *onshore*, segundo [13] (p. 2), tratam-se de infraestruturas capazes de gerar energia elétrica a partir do vento em solo terrestre. Normalmente são construídos em locais no qual deve-se considerar impactos sonoros, viabilidade ambiental e legal, potencial energético do local, variação da velocidade dos ventos durante o ano, condições geológicas locais e acessibilidade do lugar previamente à escolha do local do parque.

Os parques *offshore*, conforme [14] (p. 1), são os parques instalados em superfícies aquáticas não muito profundas, distantes da costa, das rotas de tráfego marinho, instalações navais e áreas de preservação ambiental. Nessas regiões, os ventos são mais constantes e possuem maiores velocidades. Para isso, são postos em grandes estruturas flutuantes em águas pouco profundas e afastados da costa, das rotas de tráfego marinho, das instalações navais e dos espaços de interesse ecológico. No Brasil, não há registros de parque eólicos *offshore* em operação.

## 3. ENERGIA EÓLICA NO RN

Os primeiros registros da energia eólica no RN datam de 2004, com a instalação de um pequeno parque eólico com 3 turbinas de 600 kW, construído para atender o consumo de instalações da Petrobrás. O primeiro parque para consumo público foi o parque eólico RN15, no município do Rio do Fogo, com 62 turbinas de 800 kW cada, e 48 metros de diâmetro do rotor da Wobben-Enercon [15].

Segundo [16] (p. 25), o RN está localizado na região de predomínio dos ventos alísios, que resultam em ventos de elevada constância e com ocorrência acentuada de ventos sudeste e leste. O estado possui três regiões principais no qual as velocidades médias anuais do vento são consideráveis para geração de energia eólica: Mato Grande, Litoral Setentrional e Serras Centrais, conforme [17] (p. 10). A Figura 3a mostra o mapa do RN com as indicações de cada região mencionada e das faixas de velocidades médias anuais a uma altura de 50m, adaptada do Atlas do Potencial Eólico do Rio Grande do Norte [16] (p. 53).

A Região 1 representa Mato Grande e está localizada no nordeste do estado, com 5.702,243 km<sup>2</sup>, contendo 10 municípios com empreendimentos eólicos presentes (Ceará-Mirim, Jandaíra, Jardim de Angicos, João Câmara, Parazinho, Pedra Grande, Rio do Fogo, São Bento do Norte, São Miguel do Gostoso e Touros). A Região 2 representa o Litoral Setentrional, localizado na costa norte-noroeste, com 2.978,011 km<sup>2</sup> e composto por 5 municípios (Areia Branca, Galinhos, Guamaré, Macau e Serra do Mel). Por fim, a Região 3, das Serras Centrais localizada na área central do estado, com elevadas altitudes (700 m em relação ao nível do mar), constituída por 7 municípios (Bodó, Cerro Corá, Lagoa Nova, Santana do Matos e Tenente Laurentino Cruz) e área de 3.019,926 km<sup>2</sup> altura [15, 16].

A Figura 3b [5] indica as áreas de concentração dos empreendimentos eólicos presentes no estado do RN, totalizando 294 parques, com 175 parques em operação, 35 em fase de construção e 84 com construção não

iniciada. A potência outorgada total do estado é de 4.945.396 kW. É notório ainda, quando comparado as Figuras 3a e 3b, que os parques estão presentes justamente próximos às áreas com registro de maiores velocidades média anuais.

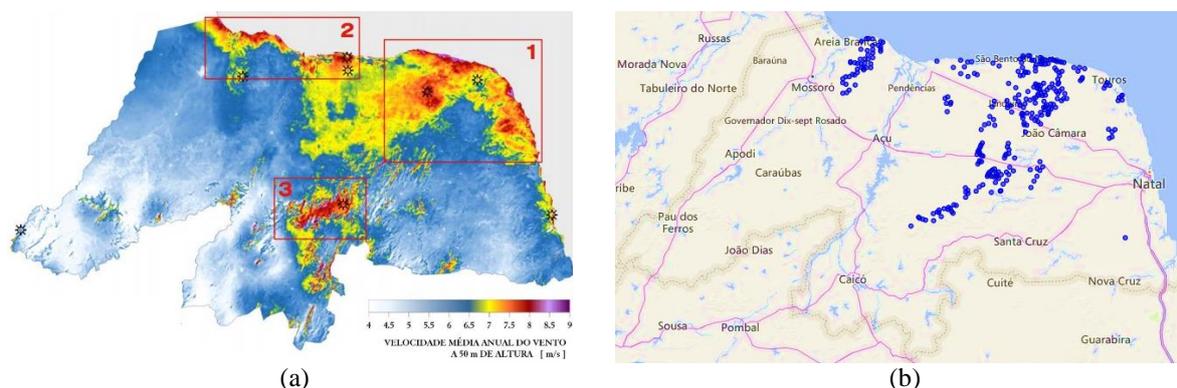


FIGURA 3. Mapa geopolítico do RN com indicações de: (a) Regiões mais promissoras para inserção de empreendimentos eólicos (Adaptado de [16]); (b) Empreendimentos eólicos em operação presentes no RN até 2021 (Adaptado de [5]).

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a coleta de dados utilizados nesta pesquisa, foram utilizados dados atualizados da ANEEL acerca dos sistemas de geração de energia elétrica do Brasil. Por meio da consulta ao cadastro dos empreendimentos [15], dados de e filtrar, por estado, informações referentes geração de energia eólica do país como a indicação dos nomes dos empreendimentos, início de operação, município em que o parque está inserido e sua potência total instalada.

Quanto às informações referentes aos aerogeradores situados em cada parque, estas podem ser consultadas em arquivos do Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico – SIGEL da ANEEL [18], onde, com auxílio do *software Google Earth Pro*<sup>1</sup>, é possível localizar os aerogeradores presentes no país. Estes arquivos contêm informações da altura da torre, diâmetro do rotor, potência nominal da turbina, que relacionando com a potência total do parque, também se obtém a quantidade total de turbinas por empreendimento. Estes dados foram utilizados para análise da evolução da energia eólica no RN a partir dos parâmetros diâmetro, altura da torre e potência da turbina. Além também da análise da potência total, quantidade de parques, diâmetro e concentração por região sob a perspectiva da quantidade de turbinas.

Dados sobre fabricantes de cada turbina foram fornecidas pela plataforma *online* de comércio eletrônico e desenvolvimento e análise para projetos de energia renovável no Brasil, a *ePowerBay*. Tais dados foram fornecidos em uma planilha que indica os fabricantes de cada parque eólico presente no país, em contato via e-mail com a empresa. Com as informações sobre fabricantes foi possível identificar o modelo de cada turbina a partir de seu *datasheet*, presente no próprio catálogo da fabricante e/ou em [19] e [20] (Os *datasheets* de alguns modelos não mais comercializados foram buscados em repositórios mais antigos do fabricante).

Foi determinado, com o auxílio dos *datasheets*, cada aerogerador quanto à sua tipologia (I, II, III, IV), permitindo assim, realizar a análise da evolução das configurações dos sistemas eólicos presentes no RN. Ao todo, foram considerados 174 empreendimentos eólicos de grande porte, desde o primeiro parque a entrar em operação, em 2004, até os parques que entraram em operação até março de 2021. Todos os dados coletados dos sistemas da ANEEL e *ePowerBay* foram reunidos e analisados em tabelas e gráficos estatísticos por meio do *software Microsoft Excel*<sup>2</sup>, trazendo um vislumbre técnico acerca da situação do setor eólico no RN [21].

#### 5. RESULTADOS

Nesta seção serão abordados os principais aspectos referentes aos parques eólicos e aerogeradores do estado, como distribuição de usinas, turbinas e potência por cidade e região, evolução dos diâmetros, alturas das torres e tipos de máquinas ao longo dos anos, mostrando as razões que levaram a tais resultados.

<sup>1</sup> *Software* livre, versão 7.3.3.7.3.3.7786 (64-bit).

<sup>2</sup> *Software* licenciado, pacote *Microsoft Office* 365, versão 2002 (Build 12527.20092).

### 5.1. Evolução dos parques e turbinas baseados na potência

Baseado nos dados coletados [21], a Figura 4, indica a evolução da energia eólica no RN, sob perspectiva da potência eólica instalada acumulada e total de 2004 a 2021. É notório, que o período de operação da energia eólica no estado, desde a entrada em funcionamento do primeiro parque até 2021, é inferior a duas décadas, entretanto, apenas em 2014, pôde-se observar um avanço significativo do setor, um vez que até 2013, potência eólica instalada era relativamente baixa, com poucos parques entrando em operação a cada ano.

Em 2014, no entanto, houve um registro significativo de novas potências eólicas que entraram em operação se mantendo alta até 2016. Nos anos seguintes, este número decresceu, mas foi suficiente para colocar o RN como líder nacional em produção de energia eólica.

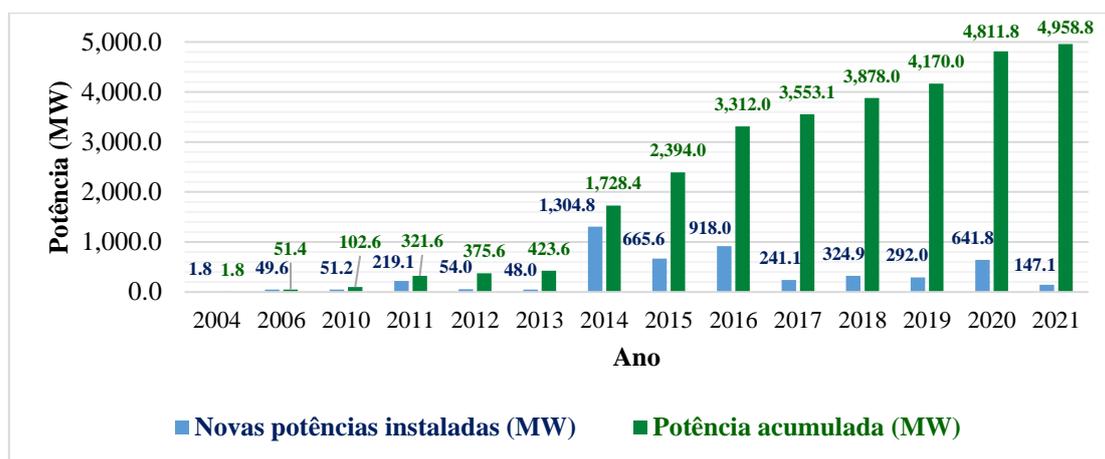


FIGURA 4. Evolução de novas potências instaladas e acumulada de 2004 a 2021 no RN (Adaptado de [21]).

É possível notar ainda que quase 60% de toda a potência eólica instalada no RN atualmente teve seu início de operação entre os anos de 2014 e 2016, o que ressalta este intervalo como o ápice da energia eólica do estado na última década. Os anos seguintes também mostraram bons resultados, em 2020, por exemplo, houve um aumento da potência eólica instalada praticamente igual ao ano de 2015. Sendo que, em 2020 entraram em operação apenas 17 novos parques, enquanto em 2015 foram 25 parques; o que, claramente é remetido a empreendimentos com turbinas com maior potência.

Na Figura 5 [21], observa-se a evolução dos aerogeradores do RN baseado em faixas de potência. É visível que apenas parques eólicos que entraram em operação nos primeiros anos (2004 e 2006) — que são os parques eólicos de Macau e Rio do Fogo — possuíam turbinas com potência nominal entre zero e 0,99 MW (65 aerogeradores ao todo), que são consideradas potências muito baixas quando comparadas a modelos mais atuais.

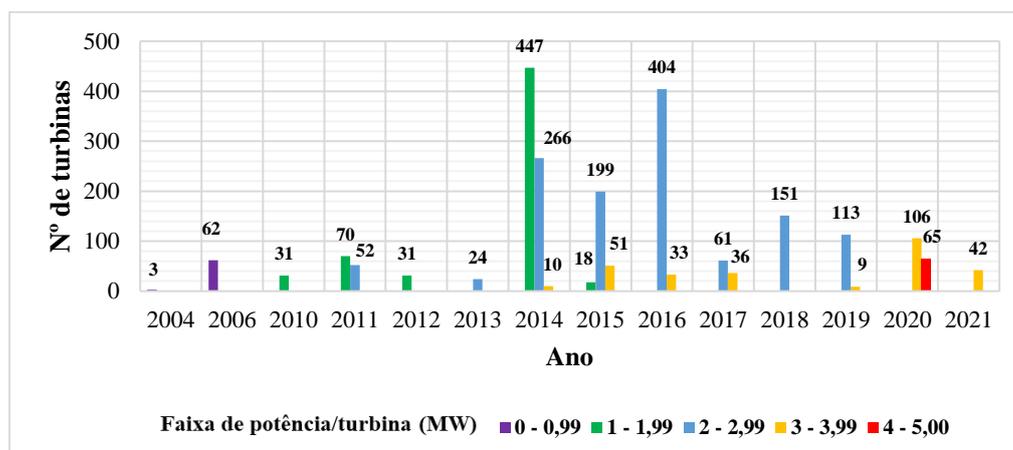


FIGURA 5. Evolução da potência/turbina instalada de 2004 a 2021 (Adaptado de [21]).

Ao longo dos anos, houve a inserção da tecnologia de turbinas mais potentes no estado. Em 2010 começou a entrar em operação os primeiros parques com potência nominal entre 1 MW e 1,99 MW, totalizando 597 turbinas nesta faixa. Entre 2 MW e 2,99 MW existem 1.270 turbinas distribuídas no estado, representando a maioritiedade dos modelos de turbinas presentes atualmente, seguida da faixa de 3 MW e 3,99 MW, com 287 parques ao todo.

Apenas em 2020 (Figura 5) entraram em operação parques com geradores na faixa de 4 MW e 5 MW, com 65 turbinas atualmente instaladas (Município de Serra do Mel). Mundialmente, a tecnologia dos aerogeradores permite modelos de maior potência. A Figura 6, adaptada de [21], relaciona a potência por turbina (MW) com a quantidade de turbinas e de parques eólicos ativos, no qual observa-se que a grande maioria das turbinas do estado possuem potência de 1,6 MW, 2 MW e 2,1 MW, que também estão presente em um maior número de parques.

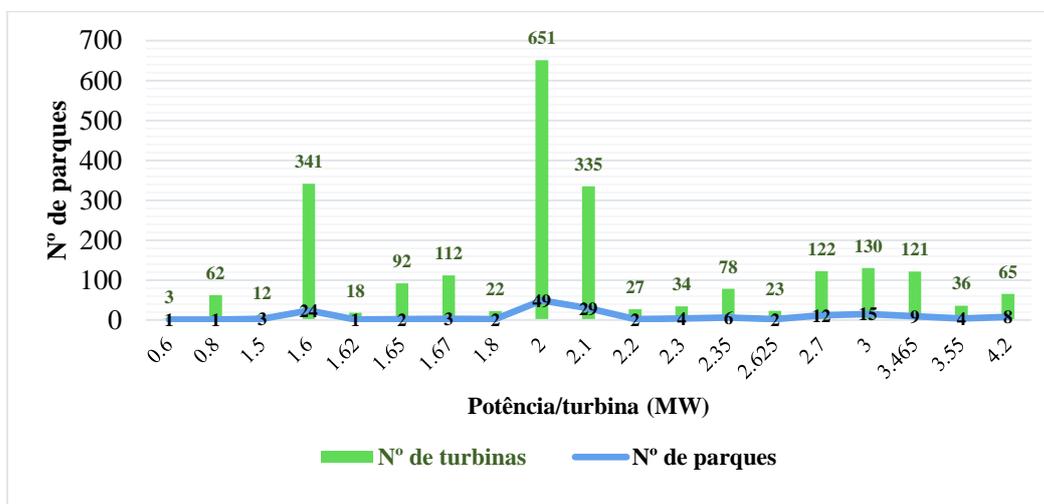


FIGURA 6. Relação do número de parques e turbinas com a potência (Adaptado de [21]).

Esses aerogeradores possuem potência inferior às disponíveis atualmente na indústria, entretanto, verifica-se que à medida que turbinas de maior potência ganharam mais visibilidade, as de potência menor perderam. Turbinas na faixa de 1MW a 1,99MW, por exemplo, foram utilizadas até 2015, com alto índice em 2014, entretanto, nos anos seguintes o uso destas foi descontinuado, ao mesmo tempo em que as turbinas nas faixas de 2 MW a 2,99 MW começaram a ser mais utilizadas, conforme observa-se na Figura 6.

A partir de 2020, é possível observar que já não houve registro de turbinas da faixa de 2 MW a 2,99 MW (Figura 6), o que pode implicar o seu desuso no futuro, diante do avanço tecnológico dos aerogeradores, uma vez que turbinas de até 4,2 MW — dobro da potência das turbinas de 2,1 MW em 2014 — foram instaladas em parques eólicos que entraram em operação em 2020.

Quanto à potência total dos parques, a Figura 7 [21] ilustra as faixas de potência e a quantidade de parques em cada faixa, no qual é notório a majoritariedade de parques com capacidade total entre 20 MW e 29,9 MW, de forma que 162 parques possuem potências restritas entre 10 MW e 40 MW (93,1%).

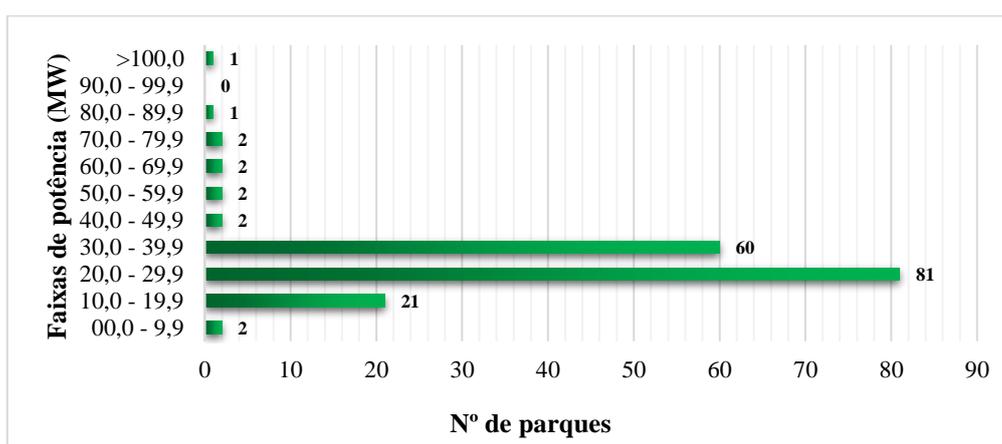


FIGURA 7. Relação das faixas de potência total com o número de parques (Adaptado de [21]).

É interessante notar ainda que o RN possui apenas um parque eólico com mais de 100 MW instalados (Parque Alegria II em Guimarães) e que, apesar de não possuir muitos parques com capacidade instalada tão elevada, é necessário considerar que há diversos parques que fazem parte de complexos eólicos. Portanto, contabilizando estes complexos, há uma maior concentração de potência distribuída numa determinada localização.

## 5.2. Os aerogeradores sob perspectiva do diâmetro do rotor e altura da torre

O estado do RN possui turbinas com diferentes diâmetros de rotor, que variam de acordo com comportamento do vento e necessidade de cada região. A tecnologia da estrutura do diâmetro depende de fatores aerodinâmicos, de modo que aumentar o seu diâmetro a fim de se obter potências superiores afeta toda a estrutura da turbina.

A Figura 8 indica a evolução dos diâmetros dos rotores dos geradores eólicos 2004 a 2021, no qual é mostrada a turbina de maior rotor instalada em cada ano [21]. É visível que nos anos iniciais, o diâmetro das turbinas cresceu rapidamente, como de 2006 para 2010 em que houve um aumento de mais de 30 metros no diâmetro entre os modelos mais modernos de cada ano.

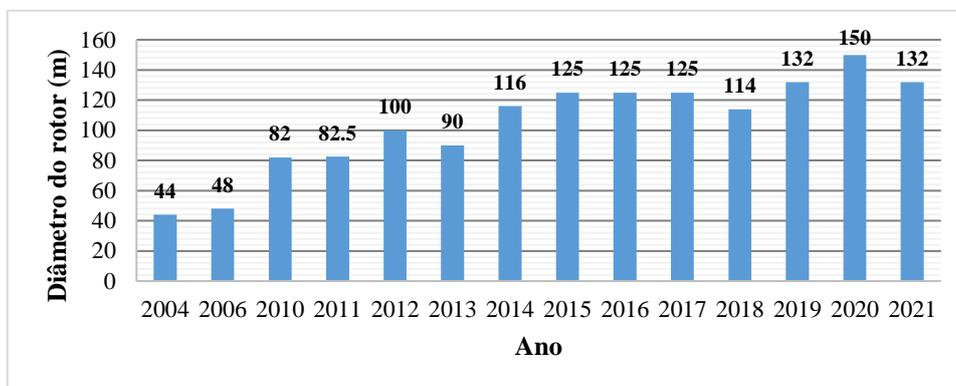


FIGURA 8. Turbinas de maior diâmetro instaladas em cada ano, de 2004 a 2021 (Adaptado de [21]).

Em 2012, os primeiros modelos com turbinas de 100 m começaram a entrar em operação. Entre 2014 e 2018 estes valores basicamente estagnaram em torno de uma média de 120 m. Em 2019 e 2020 surgiram turbinas com diâmetros ainda maiores, com 132 m e 150 m, respectivamente. É importante ressaltar que o crescimento dos diâmetros nem sempre é positivo. No ano 2018, por exemplo, a maior turbina a entrar em operação tinha diâmetro de 114 m, valor inferior aos diâmetros de turbinas instaladas nos anos de 2015 a 2017.

Esses diâmetros, na verdade, representam a melhor disponibilidade do mercado no momento em que foi realizado o projeto do parque eólico e, portanto, não implica que a tecnologia dos aerogeradores decaiu de um ano para outro, um vez que a escolha do melhor modelo depende de diversos fatores regionais específicos e não necessariamente uma turbina de maior diâmetro é mais ideal para uma determinada localização, mesmo que um maior diâmetro possibilite, teoricamente, um maior aproveitamento da energia dos ventos (Equação 1).

A Figura 9 mostra a distribuição da quantidade de turbinas para cada modelo de aerogerador presente no RN quanto ao seu diâmetro e ao número de parques em que esses geradores estão presentes [21]. É possível visualizar que uma parcela considerável de aerogeradores possui rotores de 82 m, 100 m, 110 m e 114 m.

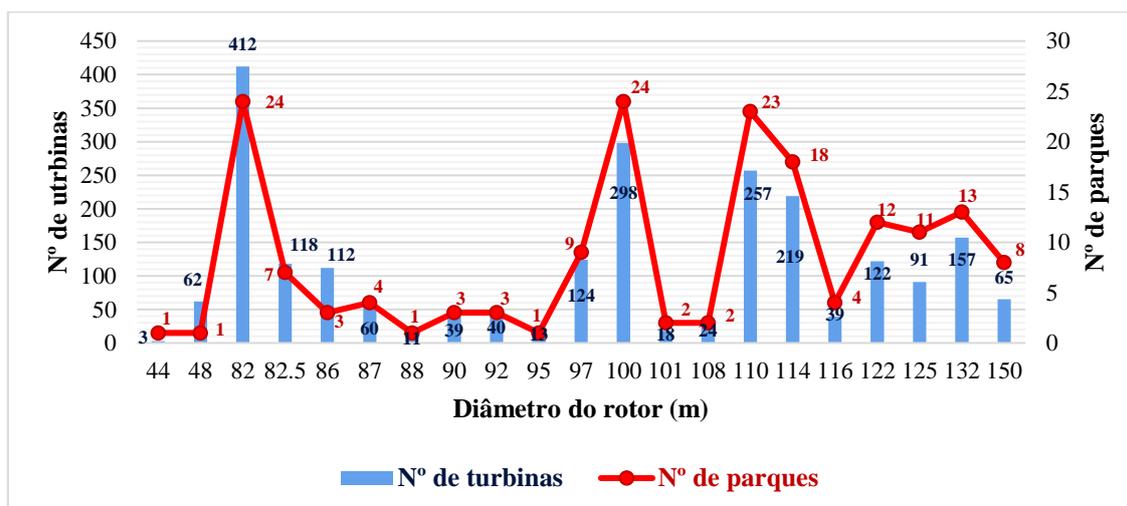


FIGURA 9. Número de parques e turbinas com determinado diâmetro presentes no RN (Adaptado de [21]).

É interessante notar que, apesar das turbinas com rotores de 82 m, por exemplo, possuírem a maior parcela (412), em comparação com a Figura 8, turbinas com este rotor foram as de maior diâmetro apenas do ano 2012, ano em que apenas três novas instalações eólicas entraram em operação. De forma semelhante, turbinas com rotores de 110 m também possuem uma quantidade significativa (257), mas não chegou a ser o modelo de turbina

com maior rotor em nenhum ano, ressaltando e complementando a turbina de maior rotor nem sempre é a opção melhor.

### 5.3. Energia eólica do RN por região

Conforme visto na seção 3, no RN existem três regiões de concentração nas quais o vento possui altos índices de qualidade (Mato Grande, Serras Centrais e Litoral Setentrional), tais regiões são onde se concentram os empreendimentos eólicos do estado e cada região possui topografias e especificidades diferentes que propiciam o aproveitamento da energia do ventos. As Tabela 1, 2 e 3 [21] mostram a distribuição de parques, turbinas e potência para cada uma dessas regiões, bem como de cada município no qual esses empreendimentos estão instalados.

TABELA 1. Distribuição de parâmetros nos municípios da região de Mato Grande (Adaptado de [21]).

<b>Município</b>	Ceará-Mirim	Jandaíra	Jardim de Angicos	João Câmara	Parazinho	Pedra Grande	Rio do Fogo	São Bento do Norte	São Miguel do Gostoso	Touros	<b>Total</b>
<b>Nº de parques</b>	5	7	2	29	22	12	2	19	11	4	<b>113</b>
<b>Nº de turbinas</b>	54	102	27	384	316	123	76	252	122	43	<b>1499</b>
<b>Potência instalada (MW)</b>	145,8	218,7	54,4	741,56	629,2	220,6	77,6	626,21	276,58	98,4	<b>3.089</b>

TABELA 2. Distribuição de parâmetros nos municípios da região de Litoral Setentrional (Adaptado de [21]).

<b>Município</b>	Areia Branca	Galinhos	Guamaré	Macau	Serra do Mel	<b>Total</b>
<b>Nº de parques</b>	6	2	8	2	26	<b>44</b>
<b>Nº de turbinas</b>	64	71	162	44	225	<b>566</b>
<b>Potência instalada (MW)</b>	160,4	118,57	264,6	70,27	782,96	<b>1396,8</b>

TABELA 3. Distribuição de parâmetros nos municípios da região de Serras Centrais (Adaptado de [21]).

<b>Município</b>	Bodó	Cerro Corá	Lagoa Nova	Santana do Matos	Tenente Laurentino Cruz	<b>Total</b>
<b>Nº de parques</b>	9	2	4	1	1	<b>17</b>
<b>Nº de turbinas</b>	130	20	46	9	14	<b>219</b>
<b>Potência instalada (MW)</b>	260	40	92	18	28	<b>438</b>

É perceptível que a maior parte da potência instalada no estado está na região de Mato Grande, com aproximadamente 3.089 MW de potência instalada — representando 62,7% de toda a potência do RN —, 113 parques (64,9%) e 1.499 turbinas (65,6%). Nesta região, os municípios que se destacam em potência são João Câmara, Parazinho e São Bento do Norte, com potência individual instalada acima de 600 MW.

Conforme mostra a Tabela 2, a região do Litoral Setentrional agrupa um menor número de municípios em relação a Mato Grande (Tabela 1), com 44 empreendimentos eólicos (25,3%) e 566 turbinas (24,8%). Possui 1.396,8 MW de potência instalada (28,4%), sendo a maior parte dessa potência contida no município de Serra do Mel (782,96 MW).

A região das Serra Centrais na Tabela 3, diferentemente das demais, é situada em uma região montanhosa com mais 700 metros acima do nível do mar e distante da região costeira, segundo [16] (p. 53) que permite ventos de qualidade suficiente para o aproveitamento de sua energia. Comtempla 17 parques eólicos (9,8%), 219 turbinas (9,6%) e 438 MW de potência instalada (8,9%).

### 5.4. Análise dos aerogeradores quanto aos fabricantes e tipo de máquina

No RN, os principais fabricantes desses aerogeradores são apresentados na Figura 10, bem como suas respectivas quantidades e porcentagens de participação. A General Electric (GE) aparece duas vezes, em uma delas

a se integrou com a Alstom, mas antes disso, forneceu geradores apenas como GE, detendo assim, a maior quantidade de aerogeradores no estado, somando 605 aerogeradores (26,49%), seguido pela Siemens/Gamesa com 583 geradores instalados e Vestas, com 439 turbinas.

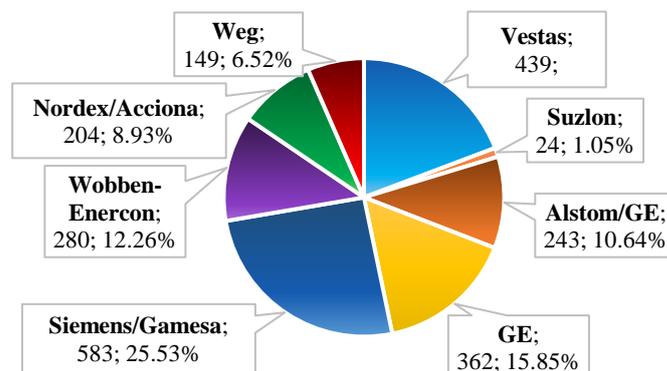


FIGURA 10. Participação dos fabricantes de aerogeradores no RN (Adaptado de [21]).

Na seção 2 foram apresentadas as diferentes configurações dos aerogeradores comercializados utilizados atualmente. Essas máquinas são escolhidas de acordo com a necessidade da região, entretanto, diversos outros fatores mais relevantes são considerados para a escolha do modelo comercial e as fabricantes de aerogeradores atuam para fabricar e fornecer o modelo ideal para cada projeto eólico.

A Figura 11 [21] mostra a evolução, de 2004 a 2021, das turbinas eólicas quanto às principais configurações (I, II, III e IV), onde observa-se a ausência completa de máquinas do tipo I no estado, o que se justifica por tratar-se de um dos modelos mais primordiais na geração de energia eólica, sendo praticamente inutilizável para geração em larga escala e pouco aplicável devido à existência dos demais modelos, que são mais vantajosos.

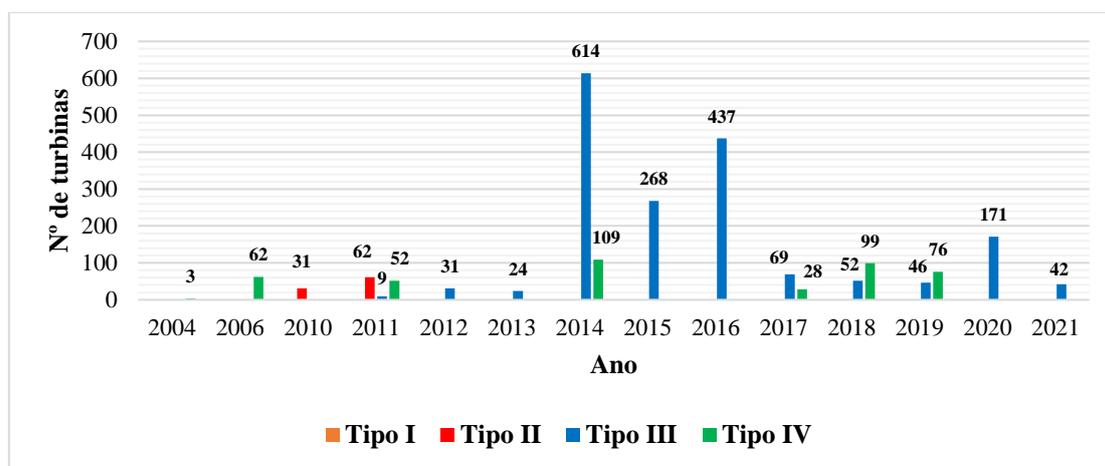


FIGURA 11. Evolução das turbinas eólicas do RN quanto ao tipo de máquina (Adaptado de [21]).

É possível observar ainda uma pequena quantidade de turbinas do tipo II em parques que entraram em operação em 2010 e 2011 (complexo eólico de Alegria, em Guamaré), somando 93 geradores (4%) ao todo. A grande maioria dos parques, entretanto, possui turbinas do tipo III que representa 77,2% do total, totalizando 1763 turbinas, seguido pelas turbinas do tipo IV, com 429 aerogeradores (18,8%). Estes dados se justificam pelas grandes vantagens das turbinas do tipo III que, conforme mencionado na seção 3.1, possuem em sua estrutura uma tecnologia de eletrônica de potência mais avançada, comparada aos tipos I e II, que permitem uma larga faixa contínua de operação baseada na velocidade do vento.

Apesar do tipo IV permitir uma faixa de operação mais eficiente e ser vantajosa em relação ao tipo III, quando se trata de manutenção, o fato de possuir um estrutura mais robusta, devido à sua grande quantidade de polos, as tornam muitas vezes inviável devido ao seu peso, afetando diretamente a logística de transporte. É interessante notar que mesmo com turbinas de tecnologia que permitem uma faixa de operação de velocidades do vento maior (tipos III e IV), o tipo II ainda se sobressaiu aos tipos III e IV.

Este caso indica que não necessariamente tecnologias melhores são a mais indicadas para uma determinada aplicação, apesar de menos comuns. O que de fato é considerado na realização do projeto é o acesso à tecnologia na época e a situação que gerará maior retorno financeiro ao proprietário, independentemente do tipo de turbina e

da fabricante, que são consequências da determinação dos parâmetros mais adequados para geração de energia elétrica por meio do vento em determinada região.

## 6. CONCLUSÃO

O Brasil, sendo um país com dimensões continentais, possui um potencial eólico vasto, principalmente na região Nordeste. No RN, especificamente, foi mostrado que existem três regiões nas quais há maior concentração de ventos com velocidades propícias para a geração de energia, sendo portanto um estado com potencial eólico de grande valor para investimentos em empreendimentos eólicos, o que justifica tratar-se de um dos estados com maior número de parques e complexos eólicos do país.

Foi determinado as principais tipologias de aerogeradores, que, são classificados em geradores de velocidade fixa (tipo I), nos quais a turbina opera em apenas uma faixa de velocidade do vento, geradores de velocidade variável com rotor bobinado (tipo II), que operam em mais de uma velocidade, geradores de indução duplamente alimentados (tipo III) e geradores síncronos com alto número de polos, que operam em faixas contínuas de velocidades do vento (tipo IV).

Quanto aos parques eólicos, foram destacadas as características evolutivas da energia eólica no RN baseado na potência eólica e número de instalações de 2004 a 2021. Foi observado que quase 60% da potência instalada no estado atualmente teve seu início de operação entre os anos de 2014 e 2016, que ressaltou este intervalo de tempo como ápice da energia eólica no estado.

Foi constatado ainda, que maioria das turbinas do estado possuem potência nominal de 1,6 MW, 2 MW e 2,1 MW, onde também estão em um maior número de parques. Em relação à potência total, observou-se que a maioria dos parques possuem capacidade total instalada entre 20 MW e 29,9 MW, de forma que 93,1% dos parques possuem potências entre 10 MW e 40 MW.

Da análise do diâmetro do rotor, foi observado que a maior parcela dos aerogeradores possui rotores de 82m, 100m, 110m e 114m (412, 298, 257 e 219 turbinas, respectivamente). Foi constatado ainda, diante dos diferentes modelos de turbina presente no RN, que menor combinação de altura com diâmetro do rotor refere-se ao primeiro parque eólico do estado, em Macau, com turbinas de 48 m de altura de torre e 44 m de rotor (altura total de 70 m). a maior combinação, por sua vez, refere-se a turbinas de 122 m altura e 150 m de rotor (altura total de 197 m), presentes nos parques de Vila Rio Grande do Norte I e Vila Sergipe I.

Em relação às áreas de concentração dos empreendimentos eólicos do RN, concluiu-se que a maior parte da capacidade instalada está situação na região Mato Grande, composta por 7 municípios, com 3.089,05 MW (62,7%), 113 parques e 1,499 turbinas, onde se destacam os municípios João Câmara, Parazinho e São Bento do norte, seguida da região do Litoral Setentrional, composta por 5 municípios, com 1.396,8 MW (28,4%), 44 parques e 566 turbinas, onde se destacam Serra do mel ,principalmente, e Guamaré. Por fim, a região das Serras Centrais, com 219 turbinas e 438 MW de potência instalada distribuídas em 17 parques eólicos localizado em 5 municípios, com destaque ao município de Bodó (260 MW).

Por último, foi realizado o estudo dos aerogeradores baseado nos fabricantes, onde verificou-se que a GE possui a maior parcela de aerogeradores instalados no estado, somando 605 turbinas (26,49%), seguida da Siemens/Gamesa com 583 turbinas (25,53%), Vestas com 439 (19,22%), Wobben-Enercon com 280 (12,26%), Nordex/Acciona com 204 (8,93%), Weg com 149 (6,52%) e Suzlon com 24 turbinas (1,05%). Também foi realizado a análise acerca das tipologias, onde constatou-se que 77,2% dos aerogeradores (1763) do RN são do tipo III, representando a majoritariedade das turbinas do estado, 18,8% referente a turbinas do tipo IV (429) e 4% de turbinas do tipo II (93), sendo o tipo apenas uma consequência do que realmente é levado em conta para escolha do modelo comercial do aerogerador.

Esses estudos mostram com profundidade aspectos básicos dos parques eólicos do RN por meio de um panorama geral atualizado com uma abordagem ilustrativa e simplificada, podendo servir como base para estudos mais aprofundados sobre um parque ou modelo de turbina em específico, seu contexto geográfico e tecnologia empregada, pertinente para o vislumbre sobre as perspectivas futuras sobre o perfil geral dos parques eólicos.

Como os dados principais apresentados neste trabalho não são atemporais, faz-se necessário a constante atualização, uma vez que são baseados em dados dos sistemas de geração da ANEEL, que são diariamente atualizados. A metodologia utilizada no trabalho também pode ser estendida para outros estados ou regiões, a fim de se obter o perfil geral de parques eólicos ou, ainda, servir como base para o desenvolvimento de códigos que automatizem o processo de coleta e análise dos dados desejados.

## REFERÊNCIAS

- [1] Mendonça, Francisco. Aquecimento global e saúde: uma perspectiva geográfica–notas introdutórias. Terra Livre, v. 1, n. 20, p.205-221, 2015.
- [2] Castro, Nivalde José de et al. A importância das fontes alternativas e renováveis na evolução da matriz elétrica brasileira. V Seminário de Geração e Desenvolvimento Sustentável. Rio de Janeiro, Brasil, p.19-29, 2009.

- [3] Resende, Fernanda de Oliveira. Evolução tecnológica dos sistemas de conversão de energia eólica para ligação à rede. *E-LP Engineering and Technology Journal*, v. 2, 2011.
- [4] Ministério de Minas e Energia - MME. *Energia no mundo: Matrizes energéticas - Matrizes elétricas 2012-2013*. Brasília - DF: MME, 2014.
- [5] Sistema de informações de geração da ANEEL - SIGA. Disponível online: [bit.ly/2IGf4Q0](http://bit.ly/2IGf4Q0) (acesso em 10/04/2021).
- [6] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. Brasília: CEPEL, 2001. 45 p.
- [7] Tipos de Aerogeradores para Geração de Energia Elétrica. Disponível online: [cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=231](http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=231) (acesso em: 06 abr. 2021).
- [8] El-Sharkawi, Mohamed A. *Energy wind: an introduction*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015. 320 p. ISBN 978-1-4822-6400-5.
- [9] Crisóstomo, Daniel Carlos de Carvalho. Tipos de máquinas. In: Crisóstomo, Daniel Carlos de Carvalho. *Simulador de controle de potência, energia e conexão à rede de aerogeradores*. Orientador: Dr. Adriano Aron Freitas de Moura. 2017. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Sistemas de Comunicação e Automação) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró/RN, 2017. p.66-71.
- [10] Wu, B. et al. *Power conversion and control of wind energy systems*. New Jersey: IEEE Press, 2011. 481 p. ISBN 978-1-118-02898-8
- [11] Umans, Stephen D. *Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. 7. ed. Porto Alegre/RS: AMGH, 2014. 708 p. ISBN 978-85-8055-374-1.
- [12] ABCDEnergia. Disponível em: [epe.gov.br/pt/ABCDEnergia](http://epe.gov.br/pt/ABCDEnergia). Acesso em: 30 mar 2021.
- [13] O que é a energia eólica onshore: você sabe como os parques eólicos onshore funcionam? Disponível online: [iberdrola.com/meio-ambiente/como-funcionam-parques-eolicos-onshore](http://iberdrola.com/meio-ambiente/como-funcionam-parques-eolicos-onshore) (acesso em: 1 abr. 2021).
- [14] O que é a energia eólica offshore: sabe como os parques eólicos offshore funcionam? Disponível online: [iberdrola.com/meio-ambiente/como-funcionam-os-parques-eolicos-offshore](http://iberdrola.com/meio-ambiente/como-funcionam-os-parques-eolicos-offshore) (acesso em: 1 abr. 2021).
- [15] Consulta empreendimentos. Disponível online: [www2.aneel.gov.br/scg/Consulta\\_Empreendimento.asp](http://www2.aneel.gov.br/scg/Consulta_Empreendimento.asp). (acesso em 1 abr. 2021).
- [16] Companhia Energética do Rio Grande do Norte - COSERN. *Potencial eólico do estado do Rio Grande do Norte*. Grupo Iderdrola, 2003. 58 p.
- [17] ARAÚJO, Marcos Antônio Alves de; AZEVEDO, Francisco Fransualdo de. *A produção de energia eólica no estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil: um olhar sobre o uso do território pelas corporações espanholas Iberdrola e Gestamp. La electricidad y el territorio. Historia y futuro*. Barcelona: Universidad de Barcelona/Geocrítica, 2017.
- [18] Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico – SIGEL/ANEEL. Disponível online: [sigel.aneel.gov.br/portal/home/index.html](http://sigel.aneel.gov.br/portal/home/index.html) (acesso em 02/04/2021).
- [19] Wind-turbine-models. Windturbines database. Disponível online: [en.wind-turbine-models.com/turbines](http://en.wind-turbine-models.com/turbines) (acesso em 10/04/2021).
- [20] The wind power. Manufacturers and turbines. Disponível online: [www.thewindpower.net/turbines\\_manufacturers\\_en.php](http://www.thewindpower.net/turbines_manufacturers_en.php) (acesso em 11/04/2021).
- [21] Análise técnica sobre as características gerais dos parques eólicos do RN. Orientador: Daniel Carlos de Carvalho Crisóstomo. 2021. Monografia (Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas. 2021. p. 60.