

## AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO TIPO DE AEROGERADOR E DA ALTURA DE INSTALAÇÃO SOBRE OS PARÂMETROS ENERGÉTICOS DE UM PARQUE EÓLICO

Clinton Pereira da Silva<sup>1</sup>  
Gilberto Calderucci Gontijo Costa<sup>1</sup>  
Pedro Leite de Souza<sup>1</sup>  
Michael Jourdain Gbedjinou<sup>1</sup>  
Ivan Felipe Silva dos Santos<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá

DOI: 10.47168/rbe.v28i2.698

### RESUMO

Diante da necessidade de se diversificar a matriz energética, a energia eólica tem sido bastante utilizada, especialmente no Nordeste do Brasil, região com alto potencial de ventos no país. Diversos são os fatores que influenciam um aproveitamento de energia eólica, dentre os quais estão o regime de ventos, a rugosidade do terreno, o tipo do aerogerador, a altura de instalação dele, dentre outros. Neste contexto, o presente estudo trata do estudo energético de um parque eólico na cidade de Maxaranguape-RN, em função dos fatores de influência. Para isso, foram estudados dois cenários. No primeiro caso, os cálculos dos parâmetros fator de capacidade, energia produzida e potência foram realizados mediante a variação da altura para um único modelo de aerogerador. Já no Cenário 2, a altura do gerador foi fixada, e os mesmos cálculos foram conduzidos para três modelos de aerogeradores. Os resultados demonstraram que o aumento da eletricidade gerada pelo parque eólico ocorre em uma proporção bem inferior ao aumento da altura delas. Além disso, a elevação da potência do aerogerador resultou em uma redução do fator de capacidade obtido. Os resultados obtidos permitiram a obtenção de uma série de conclusões sobre o impacto dos parâmetros estudados sobre o potencial eólico local.

Palavras-chave: Aerogerador; Altura de instalação; Energia eólica; Parque eólico.

### ABSTRACT

Due to the need to diversify the energy matrix, wind energy has been widely used, especially in Northeast Brazil, which has high wind potential. There are several factors that influence the use of wind energy as: wind regime, ground roughness, the type of wind turbine

and its installation height. In this context, the present study deals with the energy study of a wind farm in the city of Maxaranguape-RN, considering the influencing factors. For this, two scenarios were studied. In the first case, the calculations of the capacity factor, energy produced and power parameters were performed by varying the height for a single wind turbine model. In scenario 2 the generator height was fixed, and the same calculations were carried out for three wind turbine models. The results showed that the increase in electricity generated in the wind farm occurs at a much lower proportion than the increase in height. In addition, the increase in wind turbine power resulted in a reduction of the capacity factor. The results allowed us to get a series of conclusions about the impact of the studied parameters on the local wind energy potential.

Keywords: Wind turbine; Installation height; Wind energy; Wind farm.

## 1. INTRODUÇÃO

Há milhares de anos a energia dos ventos é utilizada pela humanidade, principalmente em atividades agrônomas, movimentação de embarcações, bombeamento de água, etc. Em tempos modernos, os novos desafios envolvem também suprir a demanda energética sem agredir o meio ambiente. Nesse contexto, a energia eólica se encaixa como uma opção de energia alternativa e renovável, sendo mais limpa que as fontes convencionais, no que tange as emissões de carbono, e abundante em grande parte do globo. Já que ela se origina da diferença no aquecimento da superfície terrestre pela radiação, lugares com maior incidência radioativa e fortes ventos tendem a ter um grande potencial para a instalação de parques eólicos (DALMAZ et al., 2008).

Diversos países passaram a investir na geração de energia eólica após a primeira grande crise do petróleo. Tal fonte era vista como uma fonte de energia viável e de grande potencial de aproveitamento, principalmente na Alemanha, Dinamarca, Espanha e Estados Unidos (USDOE, 2016). Tal potencial se confirmou e atualmente o crescimento da energia eólica no mundo é cada vez mais expressivo. Até 2016, a potência eólica instalada globalmente era igual a 52.7 GW. Em 2020, essa potência instalada superou os 90 GW, um crescimento de mais de 70% em quatro anos (GWEC, 2021).

No Brasil, os primeiros sensores especiais responsáveis por medir o potencial eólico foram instalados no Ceará e Fernando de Noronha, em 1990. De longe, a região Nordeste é a de melhor potencial para a aplicação dessa tecnologia de geração de energia, já que principalmente na costa litorânea observa-se fortes e constantes ventos durante todas as estações do ano (ALVES, 2009). Segundo Mendonça et al. (2019), o potencial eólico brasileiro se divide entre

75,0 GW na região Nordeste, 22,8 GW na região Sul, 12,8 GW nas regiões Sudeste e Norte e 3,1 GW na região Centro-Oeste, sendo, portanto, concentrado na região Nordeste.

Atualmente, a geração eólica no Brasil é superior a 57 TWh/ano, valor corresponde a cerca de 9% da eletricidade do país (EPE, 2021). O custo desses empreendimentos também tem sido reduzido ao longo dos anos, caindo de valores de cerca de 1500 a 2000 USD/kW para valores entre 500 e 1200 USD/kW entre 2009 e 2019 (CATA-RINA, 2022), o que favorece ainda mais o desenvolvimento dessas usinas no Brasil.

O componente responsável pela conversão da energia eólica em energia elétrica é a turbina eólica, ou aerogerador. A composição das turbinas eólicas pode variar dependendo da forma como o projeto foi realizado, porém três componentes principais sempre estão presentes: o rotor, o eixo e o gerador. Segundo Tolmasquim (2016), o rotor representa o conjunto das pás com o cubo, sendo que o cubo é o suporte das pás e seus sistemas de controle. Neste trabalho serão consideradas turbinas axiais (nas quais os eixos são paralelos à velocidade do vento) devido ao maior rendimento dessas (BOTAN et al., 2016).

Para os cálculos relacionados ao potencial energético de um parque eólico, diversos parâmetros devem ser considerados. A rugosidade do terreno, a altura do aerogerador, o tipo de aerogerador, o regime de ventos, dentre outros, são fatores que influenciam no aproveitamento eólico de uma região (como pode ser observado nos cálculos de RAIMUNDO; SANTOS, 2015). Neste contexto, o presente trabalho visa avaliar o impacto de dois fatores de influência sobre as grandezas energéticas de uma usina eólica, a saber, a altura e o tipo de aerogerador, sendo também construídas discussões acerca da relação entre essas grandezas e o potencial eólico estimado.

## 2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desse estudo foi selecionada uma cidade da região do Nordeste brasileiro com potencial para geração eólica. A escolha da região Nordeste se deve ao fato dessa ser a região com maior potencial eólico no país, como visto na introdução. Nesse sentido, considerou-se dois cenários distintos. Primeiramente, os cálculos foram realizados considerando cinco alturas de operação diferentes para um mesmo modelo de um aerogerador. No Cenário 2, não houve variação da altura e foram variados apenas os modelos dos aerogeradores. Para ambos os casos foram calculados a potência, a energia produzida e o fator de capacidade. Os dados de regime de vento da cidade foram utilizados para a avaliação do impacto do tipo de aerogerador e da altura de instalação sobre os parâmetros energéticos

de um parque eólico. Os tópicos 2.1 a 2.4 apresentam detalhadamente os passos necessários para os cálculos do presente trabalho.

## **2.1 Caracterização da área de estudo e seleção dos dados de vento**

A cidade analisada neste artigo foi a cidade de Maxaranguape-RN. A escolha dessa cidade se deve somente ao fato de esta ser uma cidade localizada no Nordeste (região que se pretendia estudar) e possuir elevadas velocidades médias de vento.

De acordo com o site da Prefeitura Municipal de Maxaranguape-RN, o município está localizado no litoral norte do estado do Rio Grande do Norte, apresenta uma população de 10.442 habitantes (de acordo com o censo realizado pelo IBGE no ano de 2010), ocupa uma área territorial de 131,3 km<sup>2</sup>, possui uma densidade demográfica de 79,51 hab/km<sup>2</sup> e fica a 54 km de distância da capital Natal.

Os dados dos ventos que atuam na região de Maxaranguape-RN foram coletados a partir da plataforma do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB, 2021). A velocidade média ( $V$ ) dos ventos durante o ano, a uma altura de 50 metros de altura, foi de 8,14 m/s. Os parâmetros da distribuição de Weibull obtidos,  $c$  (parâmetro de escala) e  $k$  (parâmetro de forma), são 9,18 e 2,4, respectivamente.

As curvas dos aerogeradores utilizadas nos cálculos foram retiradas do catálogo de aerogeradores do fabricante ENERCON (ENERCON, 2021), devido a elevada disponibilidade de dados em seus catálogos para diferentes tipos de aerogeradores e alturas de instalação.

## **2.2 Distribuição de Weibull**

A distribuição de probabilidade de Weibull tem sido amplamente utilizada para determinar a distribuição das velocidades de vento associadas à estimativa do potencial eólico (como por exemplo, nos trabalhos de RAIMUNDO; SANTOS, 2015 e GOMES et al., 2019). Desse modo, os parâmetros de tal distribuição para descrever a velocidade do vento estarão associadas as características do regime de vento previsto para a região. A equação 1 apresenta a função de densidade de probabilidade aplicada a velocidade do vento (GOMES et al., 2019):

$$F = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad (1)$$

$F$  = Frequência de ocorrência da velocidade de vento;

$V$  = Variável aleatória. No caso, a velocidade do vento, em m/s;  
 $k$  = Fator de forma;  
 $c$  = Fator de escala, em m/s.

Como este estudo avalia diferentes alturas de aerogerador, é necessário a realização da transposição da velocidade do vento e dos parâmetros  $c$  e  $k$  para diferentes alturas, o que foi realizado pelas equações 2 a 5 (CUSTÓDIO 2009, apud SANTOS, 2015). Para todos os casos estudados neste trabalho, o valor de rugosidade foi fixo, sendo o valor adotado igual 0,05 m (FADIGAS, 2017).

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)} \quad (2)$$

$$c_2 = c_1 \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^n \quad (3)$$

$$n = \frac{0,37 - 0,088 \ln(c_1)}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)} \quad (4)$$

$$k_2 = k_1 \left( \frac{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h_2}{10}\right)} \right) \quad (5)$$

Onde:

$z_0$  = Rugosidade do terreno = 0,05 m (FADIGAS, 2017),  $h$  = altura da torre do aerogerador, índice 1 = índice referente à altura de origem dos dados medidos e índice 2 = índice referente à altura de instalação a torre e transposição do vento.

### 2.3 Cálculos energéticos

Para o cálculo da energia, foi utilizada a equação (6), constituída pela soma dos valores de potência do aerogerador (retiradas da curva do aerogerador – ENERCON, 2021) multiplicados pela Frequên-

cia de Weibull, para cada valor de velocidade do vento da curva do aerogerador (RAIMUNDO; SANTOS, 2015).

$$E = \sum P_i \cdot F_i \cdot 8760 \quad (6)$$

$E$  = Energia, em kWh/ano;

$P$  = Potência do aerogerador para determinada velocidade do vento, em kW;

$F$  = Frequência de Weibull para determinada velocidade do vento.

Para que fosse possível realizar o cálculo fator de capacidade, foi utilizada a equação (7), que depende da energia calculada pela equação (6) e da potência máxima do aerogerador, selecionado no já mencionado catálogo do fabricante.

$$F_C = \frac{E}{(P_{Máx} \cdot 8760)} \quad (7)$$

$F_C$  = Fator de Capacidade;

$E$  = Energia, em kWh/ano;

$P_{Máx}$  = Potência máxima do aerogerador.

Por fim, foi utilizada a equação (8) para calcular a potência total instalada, que depende da potência máxima do aerogerador selecionado e do número de aerogeradores do parque eólico.

$$P_T = P_{Máx} \cdot n \quad (8)$$

$P_T$  = Potência total, em kW;

$P_{Máx}$  = Potência máxima do aerogerador;

$n$  = Número de aerogeradores.

As áreas dos parques eólicos também serão calculadas utilizando as distâncias sugeridas por Pinto (2013) para não interferência

de um aerogerador ao outro, sendo iguais a três vezes o diâmetro do rotor, lateralmente, e cinco a sete vezes o diâmetro do rotor, verticalmente.

## 2.4 Cenários Estudados

Para este estudo foram elaborados dois cenários principais. A ideia principal é comparar ambos os cenários para descobrir o impacto que as diferentes características de cada um deles tem no funcionamento, rendimento e elaboração do parque eólico.

Cenário 1: nesse cenário, foi escolhido um único modelo de aerogerador; esse modelo foi selecionado através do catálogo da empresa ENERCON (2021), que contém diversos tipos de aerogeradores com características e especificidades distintas, cada um adequado para um determinado local.

A ideia para esse cenário foi variar a altura e calcular todos os parâmetros citados anteriormente, no tópico 2.3. Para isso, foi necessário encontrar um modelo que disponibilizasse uma gama de diferentes alturas que pudesse suprir essa proposta. Visto isso, foi escolhido o modelo de aerogerador conhecido por ENERCON E-92, na versão de 2350 kW. Esse modelo dispunha de seis diferentes alturas, sendo que, delas, cinco foram escolhidas para se desenvolver o estudo, sendo elas 78, 85, 104, 108, 138 metros. A escolha dessas alturas foi feita de modo que se tivesse distâncias minimamente razoáveis entre as alturas utilizadas, a fim de que as diferenças entre os resultados obtidos pudessem ser mais visíveis.

O aerogerador escolhido tem um rotor com diâmetro de 92 metros e uma área varrida de 6648 m<sup>2</sup>. Para esse modelo, a velocidade de estabilização foi de 14 m/s, ou seja, a potência nominal de 2350 kW é alcançada justamente à essa velocidade, fazendo com que qualquer valor de velocidade de vento maior que 14 m/s tenha exatamente a mesma potência.

Optou-se por considerar nas análises um parque eólico com 10 aerogeradores. Como há cinco diferentes alturas analisadas, o cálculo referente à energia total do parque eólico deverá ser feito cinco vezes, para cada altura.

Cenário 2: De forma análoga ao Cenário 1, foram calculados o fator de capacidade, energia produzida e a potência. Nesse caso, foram selecionados três modelos da ENERCON. A ideia central nessa etapa é variar o modelo e manter a altura do cubo. Os aerogeradores selecionados foram: ENERCON E-115, com potência nominal de 3.000 kW, o ENERCON E-126 (EP4), 4.200 kW e o ENERCON E-126, 7.580 kW, de modo que se tivesse uma potência crescente. A altura do cubo é de 135 m para os três modelos escolhidos. Além das características

descritas, os modelos citados possuem, respectivamente, área de varredura equivalente a 10.515,5 m<sup>2</sup>, 12.668 m<sup>2</sup> e 12.668 m<sup>2</sup>.

Como no Cenário 1, optou-se por considerar em cada parque eólico 10 aerogeradores, sendo realizadas simulações de potencial energético utilizando três diferentes modelos de aerogeradores (valor um pouco inferior ao do primeiro cenário, no qual foram realizadas cinco simulações).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os mais relevantes resultados envolvendo ambos os cenários, juntamente com as comparações dos resultados obtidos entre eles.

#### 3.1 Resultados do Cenário 1

Os valores iniciais retirados do sistema do CRESESB (2021) para a cidade de Maxaranguape são: i) Velocidade média do Vento: 7,77 m/s; ii) Fator c: 8,44 e iii) Fator k: 2,83. Através desses fatores e das equações 2 a 5, foi possível calcular todos os valores transpostos. A seguir é apresentada a Tabela 1, contendo todos os valores utilizados nos cálculos da curva de Weibull e no cálculo de energia.

Tabela 1 – Valores base utilizados nos cálculos da Curva de Weibull e cálculos de energia

Parâmetros	Valores calculados				
H2(m)	78	85	104	108	138
H1(m)	50	50	50	50	50
V altura (m/s)	8,27	8,37	8,59	8,64	8,91
Fator n	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
k transposto	2,97	2,99	3,06	3,07	3,16
c transposto	9,57	9,74	10,16	10,24	10,78

Com todos esses valores já determinados, foi possível finalmente encontrar os valores da Frequência de Weibull e da Energia em kWh por ano. A Tabela 2 apresenta esses resultados.



Tabela 2 – Valores da frequência de Weibull e energia para cada velocidade e potência do catálogo da ENERCON

Curva aerogerador		Freq. Weibull (78 m)	Energia em (kWh/ano)	Freq. Weibull (85 m)	Energia em (kWh/ano)	Freq. Weibull (104 m)	Energia em (kWh/ano)	Freq. Weibull (108 m)	Energia em (kWh/ano)	Freq. Weibull (138 m)	Energia em (kWh/ano)
V (m/s)	P (kW)	F	E	F	E	F	E	F	E	F	E
1	0	0,003656	0	0,003286	0	0,002536	0	0,002413	0	0,001727	0
2	3,6	0,014156	446,42342	0,012978	409,287806	0,010509	331,415358	0,010091	318,217975	0,007678	242,136051
3	29,9	0,030708	8043,05348	0,02852	7470,10283	0,023817	6238,19602	0,023002	6024,87976	0,018192	4764,89691
4	98,2	0,051762	44527,129	0,048604	41810,5382	0,041645	35824,3839	0,040415	34766,3077	0,032982	28372,4408
5	208,3	0,07478	136451,622	0,070967	129494,761	0,062322	113719,488	0,060758	110865,314	0,051062	93172,2863
6	384,3	0,096373	324435,162	0,09248	311330,321	0,083311	280464,001	0,081602	274709,673	0,070659	237871,948
7	637	0,112842	629668,85	0,109595	611554,306	0,101485	566295,874	0,099904	557477,925	0,089312	498370,555
8	975,8	0,121046	1034702,69	0,119135	1018367,06	0,11371	971992,502	0,11256	962162,557	0,1042	890702,576
9	1403,6	0,119329	1467211,47	0,119185	1465439,78	0,117636	1446399,21	0,117161	1440560,14	0,112727	1386039,64
10	1817,8	0,108117	1721639,03	0,109756	1747752,89	0,112427	1790273,16	0,112734	1795173,11	0,113207	1802694,75
11	2088,7	0,089873	1644398,86	0,092884	1699493,42	0,099118	1813564,78	0,100136	1832190,34	0,105424	1928946,38
12	2237	0,068339	1339174,12	0,072025	1411418,73	0,080388	1575288,93	0,081884	1604606,09	0,090813	1779582,31
13	2300	0,047356	954133,85	0,050985	1027247,52	0,059757	1203978,34	0,061418	1237444,6	0,072107	1452810,49
14	2350	0,029777	612986,609	0,032804	675309,149	0,040539	834529,566	0,042073	866122,206	0,052553	1081846,03
15	2350	0,016909	348088,138	0,019093	393057,043	0,024978	514201,852	0,026198	539302,242	0,034989	720278,287
16	2350	0,008628	177615,397	0,010002	205907,988	0,013907	286287,716	0,014751	303661,011	0,021171	435816,037
17	2350	0,003935	81011,2689	0,004691	96572,1528	0,006959	143251,229	0,00747	153777,094	0,011577	238330,9
18	2350	0,001596	32849,652	0,001959	40328,228	0,003112	64058,4422	0,003383	69644,3164	0,005689	117117,577
19	2350	0,000572	11776,7996	0,000724	14910,7866	0,001236	25451,7435	0,001362	28043,9434	0,002497	51407,0946
20	2350	0,00018	3711,77484	0,000236	4853,25342	0,000434	8931,85092	0,000485	9980,59012	0,000973	20030,7678
21	2350	4,97E-05	1022,59995	6,72E-05	1382,52826	0,000134	2751,80199	0,000152	3120,24427	0,000334	6884,80078
22	2350	1,19E-05	244,841011	1,66E-05	342,656998	3,59E-05	739,726665	4,14E-05	851,614692	0,000101	2073,91352
23	2350	2,5E-06	50,6499737	3,6E-06	73,4513333	8,4E-06	172,422652	9,8E-06	201,645609	2,64E-05	543,913029
24	2350	4E-07	8,9998576	7E-07	13,5357643	1,7E-06	34,6294791	0,000002	41,1586881	0,000006	123,366027
25	2350	1E-07	1,3654751	1E-07	2,131472	3E-07	5,9546877	3E-07	7,1956295	1,2E-06	24,0345052

Pelos resultados da Tabela 2, nota-se que a Frequência de Weibull para alturas de 78 e 85 tem valores crescentes até uma velocidade igual a 8 m/s, passando a ser decrescentes a partir desse ponto. A energia se comporta de maneira parecida, com o detalhe de começar a decrescer somente na velocidade de 10 m/s. Sendo assim, é possível perceber qual a melhor velocidade para cada uma das alturas e qual o respectivo valor de energia passível de ser produzida anualmente por essa velocidade em cada um dos casos estudados, como exposto a seguir:

- 78 e 85 metros de altura: velocidade com maior produção de energia = 10m/s, com produções energéticas de 1.721.639 kWh/ano e 1.747.752,89 kWh/ano;

- 104, 108 e 138 metros de altura: velocidade com maior produção de energia = 11 m/s, com produções energéticas de 1.813.564 kWh/ano, 1.832.190,34 kWh/ano e 1.928.946 kWh/ano.

Nota-se, por esses resultados, a influência que a variação de altura teve nesse ponto de geração ideal, já que quando ela varia a energia gerada e a velocidade em que esse ponto se encontra também se alteram. Esse comportamento é ainda mais visível nos gráficos das Figuras 1 e 2, pois eles contêm justamente curvas que representam o comportamento da Frequência de Weibull e a geração de energia, em função da velocidade, respectivamente.

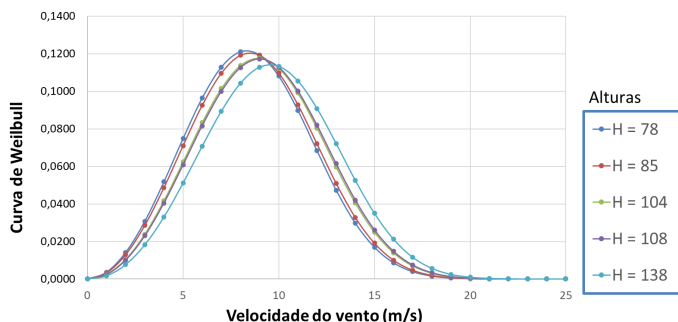


Figura 1 - Comportamento das curvas de Weibull para cada altura em função da velocidade do vento

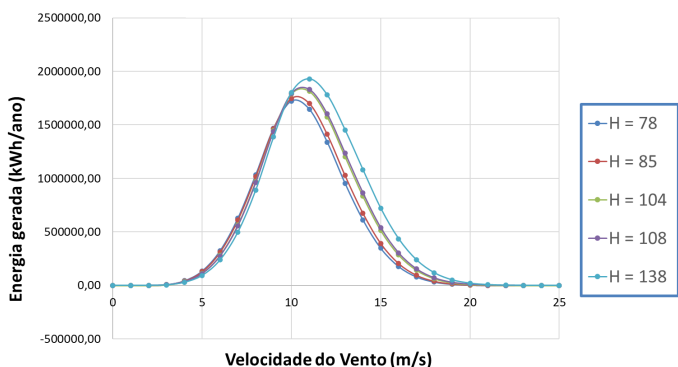


Figura 2 - Comportamento das curvas de energia em cada altura, em função da velocidade do vento

Nota-se pela Figura 1 que as curvas de menor altura apresentam picos de frequências maiores, mas são pior distribuídas ao longo das velocidades de vento. Já as curvas de Weibull para alturas maiores, atingem picos menores de frequência  $F$ , mas são melhor distribuídas ao longo das velocidades de vento, devido ao fato de atingirem velocidades mais altas. Assim sendo, pode-se dizer que a variação de altura está diretamente ligada à permanência da Curva de Weibull, influenciando seu comportamento de forma inversamente proporcional.

Já na Figura 2, o comportamento da geração de energia se difere da curva de frequência de Weibull (Figura 1) justamente pela maneira que é influenciada pela variação da altura, dado que as curvas de maiores alturas resultam em picos maiores de geração de energia. Assim, em termos energéticos, a definição de alturas de aerogeradores mais elevadas é mais vantajosa. Contudo, torres mais altas impactam também o custo dessas estruturas. Por essa razão, estudos econômicos que investiguem a viabilidade econômica dos parques eólicos em função da altura do aerogerador são necessários.

O arranjo escolhido para esse parque eólico é de duas linhas, ambas de frente para o vento. Cada uma das linhas terá cinco aerogeradores, totalizando os 10 propostos. A distância lateral entre cada um dos cinco aerogeradores será de 276 metros (três vezes o diâmetro do rotor), enquanto a distância frontal entre a primeira e a segunda linha será de 460 metros (cinco vezes o diâmetro do rotor) (conforme as distâncias sugeridas por PINTO, 2013).

Considerando que entre cada aerogerador, lateralmente, há quatro espaços, a distância total lateralmente é de 1104 metros. Sendo assim a área do parque referente ao Cenário 1 se dá pela simples multiplicação do comprimento lateral e do comprimento frontal, sendo igual a 507.840 m<sup>2</sup>. A potência instalada total é obtida pela multiplicação entre a soma da potência de cada aerogerador pelo número de aerogeradores, sendo igual a 23.500 kW. Tem-se, portanto, uma densidade de potência de 46,2 W/m<sup>2</sup>.

A Tabela 3 apresenta os resultados energéticos calculados para o parque estudado. Por esta, observa-se que um aumento da altura de 60 m (aumento de 77%) resulta em um aumento de 22 GWh/ano na geração total do parque eólico (aumento de cerca de 20%). Tem-se então que o aumento na altura da torre não implica aumento proporcional da energia produzida. O fator de capacidade também aumenta com o aumento da altura das turbinas eólicas, o que pode ser facilmente compreendido pela equação 7, dado que se tem um aumento da energia produzida sem a elevação da potência instalada. Assim, para o local e para o aerogerador escolhido, tem-se uma melhor utilização do recurso natural com o aumento da altura dos parques. Os elevados valores de fator de capacidade encontrados podem ser

explicados pela elevada média de velocidade do vento no local, igual a 7,7 m/s.

Tabela 3 - Resultados energéticos em função da altura do aerogerador

Tipo de aerogerador	Altura (m)	F <sub>c</sub>	Energia total dos 10 aerogeradores (GWh/ano)
E-92	78	0,5136	105,74
	85	0,5297	109,05
	104	0,5676	116,85
	108	0,5747	118,31
	138	0,6207	127,78

### 3.2 Resultados do Cenário 2

Como mencionado anteriormente, este cenário é desenvolvido com três modelos distintos de Aerogeradores, e todos operando em uma altura fixa de 135 metros. Dessa forma, foi necessário calcular a Frequência de Weibull, e o valor de Energia por ano para cada um dos modelos. Os mesmos dados iniciais obtidos junto ao CRESESB (2021), já mencionados anteriormente, foram utilizados para o cálculo da velocidade média, do fator de escala e do fator de forma transpostos para a altura estudada, de 135 m (Tabela 4).

Tabela 4 – Valores base utilizados nos cálculos da Curva de Weibull e da energia

Parâmetros	Valor calculado
H2(m)	135
H1(m)	50
V altura (m/s)	8,77
Fator n	0,21
k transposto	3,15
c transposto	10,42

Após determinar esses valores, foi possível realizar o cálculo da Frequência de Weibull e da energia, em kWh, gerada em um ano. Para cada valor de velocidade existe um valor de potência relacionado, e todos esses valores podem ser encontrados no já citado catálogo de

aerogeradores utilizado (ENERCON, 2021). Como já mencionado, os tipos de aerogeradores usados foram: ENERCON E-115, (3.000 kW), ENERCON E-126 (EP4) (4.200 kW) e o ENERCON E-126 (7.580 kW). Na Tabela 5, estão dispostos todos os valores calculados de Frequência de Weibull e de energia para cada aerogerador em questão.

Ao se analisar os valores obtidos da Tabela 5, é possível notar que os valores encontrados de energia aumentam à medida que a potência nominal dos aerogeradores também aumenta. Já a Frequência de Weibull não se altera, isso porque a altura para os três tipos de aerogeradores é igual. A Frequência de Weibull varia da mesma forma para os três aerogeradores e pode-se observar que ela apresenta valores crescentes até 9 m/s, sendo que velocidades superiores a essa têm valores de energia decrescentes. A energia varia de modo similar para os três tipos de aerogeradores, contando com valores crescentes até a velocidade de 11 m/s, a partir dos quais começam a decrescer.

Tabela 5 – Valores da frequência de Weibull e energia para cada velocidade e potência do catálogo da ENERCON

Curva aerogerador E-115		Freq. Weibull (135 m)	Energia em (kWh/ano)	Curva aerogerador E-126 (EP4)		Freq. Weibull (135 m)	Energia em (kWh/ano)	Curva aerogerador E-126		Freq. Weibull (135 m)	Energia em (kWh/ano)
V (m/s)	P (kW)			V (m/s)	P (kW)			V (m/s)	P (kW)		
1	0	0,001953182	0	1	0	0,001953182	0	1	0	0,001953182	0
2	3	0,00863154	226,8368592	2	0	0,00863154	0	2	0	0,00863154	0
3	48,5	0,020353612	8647,435757	3	58	0,020353612	10341,26338	3	55	0,020353612	9806,370446
4	155	0,036702801	49835,06296	4	185	0,036702801	59480,55902	4	175	0,036702801	56265,39367
5	339	0,05642382	167558,4316	5	400	0,05642382	197709,0638	5	410	0,05642382	202651,7904
6	627,5	0,077348337	425176,0758	6	745	0,077348337	504790,7194	6	760	0,077348337	514954,291
7	1035,5	0,09655316	875831,7856	7	1200	0,09655316	1014966,821	7	1250	0,09655316	1057257,105
8	1549	0,110835172	1503949,054	8	1790	0,110835172	1737939,836	8	1900	0,110835172	1844740,608
9	2090	0,117459417	2150493,988	9	2450	0,117459417	2520914,005	9	2700	0,117459417	2778150,128
10	2580	0,1149749	2598524,71	10	3120	0,1149749	3142401,975	10	3750	0,1149749	3776925,45
11	2900	0,103774107	2636277,411	11	3660	0,103774107	3327163,906	11	4850	0,103774107	4408946,705
12	3000	0,086096763	2262622,932	12	4000	0,086096763	3016830,576	12	5750	0,086096763	4336693,954
13	3000	0,065388669	1718414,22	13	4150	0,065388669	2377139,671	13	6500	0,065388669	3723230,81
14	3000	0,045240444	1189918,858	14	4200	0,045240444	1664486,401	14	7000	0,045240444	2774144,001
15	3000	0,028360547	745315,1677	15	4200	0,028360547	1043441,235	15	7350	0,028360547	1826022,161
16	3000	0,016015418	420885,1725	16	4200	0,016015418	589239,2416	16	7500	0,016015418	1052212,931
17	3000	0,008097038	212790,1668	17	4200	0,008097038	297906,2335	17	7580	0,008097038	537649,8215
18	3000	0,003641581	95700,74415	18	4200	0,003641581	133981,0418	18	7580	0,003641581	241803,8802

Tabela 5 – Valores da frequência de Weibull e energia para cada velocidade e potência do catálogo da ENERCON (cont.)

Curva aerogerador E-115		Freq. Weibull (135 m)	Energia em (KWh/ano)	Curva aerogerador E-126 (EP4)		Freq. Weibull (135 m)	Energia em (KWh/ano)	Curva aerogerador E-126		Freq. Weibull (135 m)	Energia em (KWh/ano)
V (m/s)	P (kW)			V (m/s)	P (kW)			V (m/s)	P (kW)		
19	3000	0,001447254	38033,82277	19	4200	0,001447254	53247,35188	19	7580	0,001447254	96098,7922
20	3000	0,000504805	13266,28809	20	4200	0,000504805	18572,80332	20	7580	0,000504805	33519,4879
21	3000	0,000153459	4032,905977	21	4200	0,000153459	5646,068367	21	7580	0,000153459	10189,8091
22	3000	4,03696E-05	1060,914059	22	4200	4,03696E-05	1485,279682	22	7580	4,03696E-05	2680,576189
23	3000	9,1235E-06	239,7656778	23	4200	9,1235E-06	335,6719489	23	7580	9,1235E-06	605,8079459
24	3000	1,7584E-06	46,21071919	24	4200	1,7584E-06	64,69500687	24	7580	1,7584E-06	116,7590838
25	3000	2,86869E-07	7,538922303	25	4200	2,86869E-07	10,55449122	25	7580	2,86869E-07	19,04834369

As Figuras 3 e 4, a seguir, apresentam o comportamento detalhado da frequência de Weibull e da energia produzida pelo parque eólico em função da velocidade do vento. Por estas nota-se o elevado impacto das potências dos aerogeradores sobre a curva de produção de energia. Pela Figura 4, é possível verificar também que o modelo de aerogerador que mais gera energia é o E – 126. Diferentemente da análise anterior, na qual as alturas dos aerogeradores foram alteradas, não foi verificada variação da velocidade de maior produção energética entre os tipos de aerogeradores neste cenário.

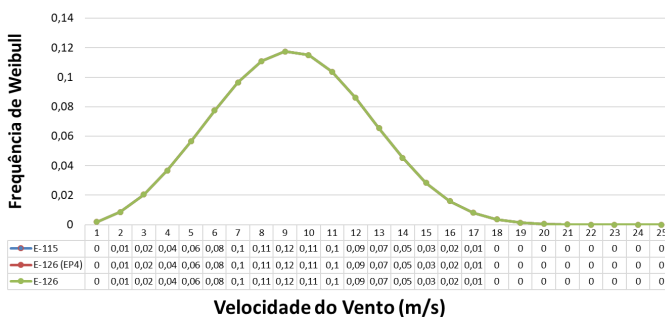


Figura 3 - Comportamento das curvas de Weibull para cada altura em função da velocidade do vento

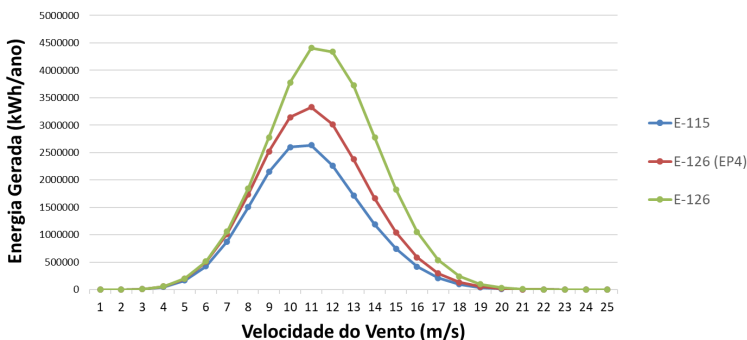


Figura 4 - Comportamento das curvas de energia em cada altura em função da velocidade do vento

Se considerarmos o aerogerador E-126, de maior produção energética, é possível determinar a área do parque eólico, já que cada uma das 10 unidades do modelo E – 126 tem o mesmo diâmetro do rotor, igual a 127 metros. O arranjo adotado para esse parque será exatamente igual ao do Cenário 1, com duas linhas, ambas de frente para o vento. Cada uma das linhas terá cinco aerogeradores, totalizando os 10 propostos. A distância lateral entre cada um dos cinco aerogeradores será de 381 metros enquanto a distância frontal entre a primeira e a segunda linha será de 635 metros. Considerando que entre cada aerogerador, lateralmente, há quatro espaços, a distância total lateral é de 1524 metros. A área do parque eólico para compor o Cenário 2 pode ser então calculada por essas dimensões, sendo igual a 967.740 m<sup>2</sup>, valor 90% superior ao do cenário anterior. A potência instalada também é bastante superior ao do cenário anterior, sendo igual a 75.800 kW, o que resulta em uma densidade de potência de 78,32 kW/m<sup>2</sup>, valor quase 70% superior ao do cenário anterior. Por esses resultados, observa-se que o uso do aerogerador E-126, apesar de implicar custos mais elevados devido ao maior porte do aerogerador, possui melhor desempenho em termos energéticos e utiliza melhor a potência disponível na região, apresentando uma densidade de potência extraída por m<sup>2</sup> bem superior ao primeiro cenário.

A Tabela 6 resume os resultados energéticos do parque eólico para cada um dos tipos de aerogeradores. Verifica-se nessa tabela uma diminuição do fator de capacidade em função da potência do aerogerador escolhido. Esse comportamento é esperado, dado que a energia produzida pelo parque não cresce de modo linear com o aumento da potência (veja equação 7). Esse resultado mostra também que não necessariamente a opção de maior fator de capacidade resul-

tará em maior produção de energia. A instalação de uma potência inferior pode ser menos afetada pelas variações anuais do vento (o que leva a um maior fator de capacidade), sendo, contudo, menor do que a real disponibilidade local, subutilizando o potencial eólico da região.

Tabela 6 - Resultados energéticos em função do tipo de aerogerador

Tipo de aerogerador	Fator de capacidade	Energia total em GWh/ano	Potência total em kW
E-115	0,6513	171,18	30.000
E-126(EP4)	0,5902	217,18	42.000
E-126	0,4410	292,85	75.800

#### 4. CONCLUSÃO

O presente artigo apresenta uma análise do potencial eólico de uma cidade do Nordeste Brasileiro em função de considerações da altura e dos tipos de aerogeradores de um parque eólico. Os resultados obtidos demonstraram a forte influência desses fatores sobre o potencial energético passível de ser aproveitado na região estudada.

A análise do impacto da variação da altura dos aerogeradores sobre o potencial energético revelou que a altura do aerogerador impacta no formato das curvas de distribuição de Weibull, sendo que quanto maior é a altura dessa estrutura, menor é a velocidade de vento mais provável na região. Outro resultado relevante identificado foi que o aumento na altura das torres não implicou aumento proporcional da energia produzida. Assim sendo, não se deve esperar um aumento linear da energia passível de ser produzida com o aumento das alturas das torres.

A elevação da potência do aerogerador resultou em uma redução do fator de capacidade obtido, o que leva a conclusão de que o projeto de maior fator de capacidade (que escolhe uma potência menos afetada pelas variações do regime de ventos locais) não é necessariamente o de maior produção de energia.

Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se: i) a inclusão de estudos econômicos nos resultados do presente estudo, com o fim de verificar qual das opções aqui estudadas é melhor em termos econômicos e, também, verificar as relações entre os parâmetros de viabilidade econômica com os parâmetros energéticos calculados, tais como densidade de potência, fator de capacidade e energia produzida; e ii) a repetição do mesmo procedimento aqui aplicado para regiões ou cidades com parques eólicos já instalados, considerando tipos de ae-



rogeradores comumente utilizados nessas regiões, para que se tenha resultados em uma situação mais próxima da real em um parque eólico já em funcionamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. J. A. Análise regional da energia eólica no Brasil. Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional, Guarabira, v. 3, n. 1, p. 166-188, nov. 2009.

BOTAN, A. C. B. TIAGO FILHO, G. L. CAMACHO, R. G. R. DUARTE, P. M. SANTOS, I. F. S. Energia Hidrocinética: Aproveitamento em Correntes de Baixas Velocidades. Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. Gramado (RS), 2016.

BRASIL. Prefeitura Municipal de Maxaranguape. Desenvolvimento com responsabilidade. 2021. Disponível em: <https://site.maxaranguape.rn.gov.br/>. Acesso em: 07 dez. 2021.

CATARINA, A. S. Wind power generation in Brazil: An overview about investment and scale analysis in 758 projects using the Levelized Cost of Energy. Energy Policy, V. 164, 112830, 2022.

CRESESB. Potencial Eólico - Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. 2021. Disponível em: [http://cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas\\_eolico](http://cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico). Acesso em: 07 dez. 2021.

CUSTÓDIO, R. S. Aspectos econômicos da energia eólica. In: CUSTÓDIO, R. S. Energia eólica para produção de energia elétrica. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009.

DALMAZ, A. S. COLLE, S. PASSOS, J. C. Energia Eólica para Geração de Eletricidade e a Importância da Previsão. Revista ABCM - Engenharia, Florianópolis, v. 8, n. 1, p. 53-63, out. 2008.

ENERCON. Linha de produtos ENERCON. 2021. Disponível em: [http://www.wobben.com.br/fileadmin/user\\_upload/ec\\_product\\_br.pdf](http://www.wobben.com.br/fileadmin/user_upload/ec_product_br.pdf). Acesso em: 07 dez. 2021.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. BEN - Balanço Energético Nacional. Relatório Síntese 2021: Ano Base, 2020. 2021.

FADIGAS, E. A. F. A. Energia Eólica. In: Moreira, J. R. S. Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética. Rio de Janeiro, LTC - GEN – Grupo editorial nacional, p. 160-186, 2017.

GOMES, M. S. S. PAIVA, J. M. F. MORIS, V. A. S. NUNES, A. O. Proposal of a methodology to use offshore wind energy on the southeast coast of Brazil. Energy, V. 185, 327-336, 2019.

GWEC. Global Wind Energy Council. Global Wind Report, 2021.

MENDONÇA, I. M. Prospects for wind power generation in Brazil. Brazil Journal of Development. Curitiba, v. 5, n. 10, p. 18598-18611, out. 2019.

PINTO, M. O. Fundamentos de Energia Eólica. Editora LTC, Rio de Janeiro, 392 p., 2013.

RAIMUNDO, D. R. SANTOS, I. F. S. Estudo de um projeto para geração de energia eólica no Brasil: Viabilidade econômica e emissões evitadas. Revista Brasileira de Energias Renováveis. V. 4, 2015.

SANTOS, P. M. D. Procedimento para prospecção de potencial eólico com auxílio de sistemas de informação geográfica. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia), Universidade Federal de Itajubá (MG), 119 p., 2015.

TOLMASQUIM, M. T. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. Rio de Janeiro: 2016.