



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Avaliação do potencial eólico dos municípios de Arcoverde e Petrolina - PE

Hugo Luís de Araújo Bôa-Viagem¹, Clérison Moura Vieira Júnior^{1,2}, Sérgio Peres³

¹Graduado em Engenharia Mecânica Industrial pela Universidade de Pernambuco (UPE). Escola Politécnica de Pernambuco (POLI), Universidade de Pernambuco, CEP: 50.720-001, Rua Benfica, 455, Madalena, Recife (PE), Brasil, Tel.: (+55 81) 98623-5083, hugolabv@gmail.com.; ²Discente do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares (PROTEN), Departamento de Energia Nuclear (DEN); Universidade Federal de Pernambuco, CEP 50.740-545 Av. Prof. Luiz Freire, 1000, Cidade Universitária, Recife (PE), Brasil, Tel.: (+55 81) 99765-7390, cleriston.vieira@ufpe.com.; ³Doutorado em Engenharia Mecânica pela University of Florida. Livre-docente e professor do Departamento de Engenharia Mecânica e do programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas da Universidade de Pernambuco (UPE). Escola Politécnica de Pernambuco (POLI), Universidade de Pernambuco, CEP: 50.720-001, Rua Benfica, 455, Madalena, Recife (PE), Brasil, Tel.: (+55 81) 99123-0110, sergperes@gmail.com.

Artigo recebido em 02/10/2022 e aceito em 24/04/2023

RESUMO

A importância de se ter uma matriz limpa e renovável que contribua para o desenvolvimento sustentável vem ganhando notoriedade no mundo. No Brasil, embora haja algumas divergências entre especialistas, estudos recentes mostram que o país apresenta valores de potencial eólico muito consideráveis sendo o Nordeste a região mais abundante nesse recurso, com cerca de 35 % do potencial brasileiro. Dessa forma, a presente pesquisa visa, através da coleta de dados de ventos, estudar o comportamento do vento em dois municípios do estado de Pernambuco: Arcoverde e Petrolina. Através deles, foi possível analisar a direção e velocidade do vento e calcular o potencial eólico além da energia fornecida de cada local. Os resultados demonstram que as duas cidades há ótimos valores de potência eólica projetada para alturas de 100 m e 150 m. Para a configuração de aerogeradores adotadas, as duas cidades apresentaram uma energia fornecida para altura de 150 m capaz de abastecer uma cidade de, aproximadamente, 3000 habitantes. Ambas as cidades apresentaram predominância de ventos na direção Sudeste.

Palavras-chave: Energia renovável, energia eólica, características do vento, Pernambuco, Brasil.

Evaluation of the wind potential of the municipalities of Arcoverde and Petrolina -PE

ABSTRACT

The importance of having a clean and renewable matrix that contributes to sustainable development has been gaining notoriety worldwide. In Brazil, although there is some disagreement among experts, recent studies show that the country has very considerable wind potential values and the Northeast region is the most abundant in this resource, with about 35 % of the Brazilian potential. Thus, the present research aims, through the collection of wind data, to study the wind behavior in two cities in the state of Pernambuco: Arcoverde and Petrolina. Through them, it was possible to analyze the wind direction and speed and calculate the wind potential in addition to the energy supplied from each location. The results show that both cities have optimum projected wind power values for heights of 100 m and 150 m. For the adopted wind turbine configuration, the two cities presented a supplied energy for a height of 150 m capable of supplying a city of approximately 3000 inhabitants. Both cities had predominantly southeasterly winds.

Keywords: Renewable energy, wind power, wind features, Pernambuco, Brazil.

Introdução

A energia é uma das necessidades básicas do ser humano, porém com a recente crise energética, o aumento da poluição ambiental, o investimento global no desenvolvimento, além das metas dos países para descarbonizar seus setores de eletricidade, a utilização de fontes de energia renovável disparou (Pacheco &

Santos, 2011; Azadani, 2023; Ha et al., 2023; Hoen et al., 2023; Verma et al., 2023; Wang et al., 2023; Wu et al., 2023).

A energia eólica é uma valiosa fonte de energia limpa e renovável, sendo vista como uma potencial substituta para as fontes de energia tradicionais (Dai et al., 2023; Zhang et al., 2023). Consiste em uma das

energias renováveis cujo uso está crescendo muito rápido nas últimas décadas, desempenhando um papel cada vez mais importante na estrutura energética mundial (Camelo et al., 2011; Pinto et al., 2017; Lin et al., 2022; Al-Sanad et al., 2023; Alanis Ruiz et al., 2021; Brackmann, 2009; Gennitsaris et al., 2023; Hesami & Nikseresht, 2023; S. Li et al., 2023;). Há uma tendência de crescimento no consumo de energia eólica. Além disso, estima-se que os ventos ofereçam um potencial energético, aproximadamente, 200 vezes maior que o consumo atual de energia (Custódio, 2013).

No período entre 1970 e 1980, depois da primeira grande crise dos preços do petróleo mundial, o Brasil e diversos outros países, ampliaram seus projetos de pesquisa sobre a utilização do vento como gerador de energia elétrica. No cenário atual, mundialmente, a China vem liderando a geração eólica, seguida de Estados Unidos e Alemanha. O Brasil é o sétimo país do mundo em capacidade instalada, atingindo 20.771 MW (EPE, 2022; Lee & Zhao, 2022).

O Brasil apresenta valores de potencial eólico ótimos, embora haja algumas divergências entre especialistas. Atualmente, vários estudos convergem para valores na ordem de 500 GW. O Nordeste é a região mais abundante em recursos eólicos, concentrando, inclusive, o maior número de parque eólicos do país (Zaparolli, 2019).

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN), considerando a matriz elétrica brasileira em 2021, a fonte eólica aparece na terceira colocação com uma representatividade de 10,6%, atrás apenas da fonte hidráulica (56,8%) e biomassa (8,2%) (Empresa de Pesquisa Energética, 2021). A produção de eletricidade a partir da fonte eólica em 2021 foi de 72,3 TWh, tendo um aumento de 26,7% em relação ao ano anterior. Em 2015, a geração eólica havia ultrapassado a geração nuclear. Já em 2019, ultrapassou a geração à biomassa, e em 2020, com um aumento de 1,90% em relação à 2019, consolidou sua liderança entre essas três fontes (EPE, 2022).

O presente trabalho tem como objetivo estudar o potencial eólico dos municípios de Arcoverde e Petrolina no Estado de Pernambuco.

Ventos

O vento pode ser definido como um movimento do ar na atmosfera. Esse movimento é decorrente da diferença de aquecimento nas porções de

ar causada pela irradiação solar. Esse gradiente de temperatura acarreta uma diferença de pressão, gerando o movimento das massas de ar (Alves, 2011; M. O. Pinto, 2012). Para indústria eólica, é de grande importância o estudo da identificação do potencial eólico de uma localidade para avaliação do potencial de implantação de parques eólicos, sendo necessárias séries temporais da velocidade e direção do vento a uma altura adequada (Paula et al., 2011).

Os ventos podem ser divididos em duas componentes: uma vertical e uma horizontal. A componente vertical é importante para o movimento de composição das nuvens e ocorre na direção perpendicular ao solo. Já a componente horizontal – que ocorre na direção Leste-Oeste ou Norte-Sul – é muito mais intensa. Nesse contexto, o termo “vento” será utilizado apenas para denominar as componentes horizontais do movimento (Martins et al., 2008).

Pelo fato de haver atrito do ar com a superfície e a Terra rotacionar, os ventos são controlados pela combinação de quatro forças. Se esses dois fatores não existissem, o movimento dos ventos ocorreria, simplesmente, da região de maior pressão para a de menor pressão (Lutgens & Tarbuck, 1995).

A Força gradiente de pressão ocorre da seguinte maneira: um gradiente de pressão existe quando a pressão do ar varia de um lugar para o outro. Havendo uma variação espacial da pressão, ocorre o surgimento de uma força, com o intuito de equilibrar as pressões; ou seja, o ar se movimenta de regiões de maior pressão para regiões de menor pressão, gerando, portanto, os ventos. Essa força é a única geradora de movimento. As demais servem apenas para modificar sua direção, mas não para produzi-lo (Lutgens & Tarbuck, 1995).

Em decorrência da aceleração centrífuga da rotação da Terra, surgem duas novas forças: a Força de Coriolis e a Força centrípeta. A primeira acontece de forma paralela à superfície da Terra, e atua na direção perpendicular ao movimento sobre as massas de ar. Por outro lado, a Força centrífuga atua perpendicularmente à superfície da Terra, na mesma direção da força gravitacional (Lutgens & Tarbuck, 1995).

A última força que atua sobre o vento é a Força de atrito, que tem como objetivo diminuir o seu movimento. Ela tem influência apenas nas camadas mais próximas à superfície e pode ser desconsiderada em grandes alturas (Lutgens & Tarbuck, 1995).

O aproveitamento da energia cinética presente nas massas de ar em movimento é também uma alternativa para o semiárido nordestino (Silva & Severo, 2012).

Rugosidade da superfície

Além da diferença de pressão, outro fator influencia no deslocamento de ar no sentido horizontal. Obstáculos como montanhas, construções e vegetações aumentam a rugosidade da superfície. Quanto menor a rugosidade da superfície, menor será a barreira encontrada pelo vento para a sua circulação e maior será sua velocidade. A velocidade do vento tende a aumentar à medida que se afasta da superfície devido à diminuição da força de atrito atuante sobre o fluido e à rugosidade (M. Sato, 2005).

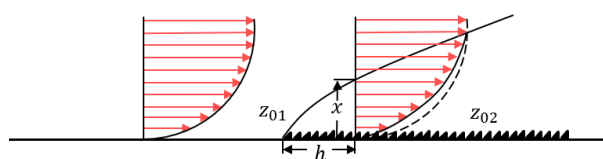


Figura 1. Influência da rugosidade no perfil do vento.

Para que se possa descrever, modelar e que haja uma previsão do comportamento do vento e da turbulência em diferentes escalas é de fundamental importância o conhecimento a respeito das características aerodinâmicas, na qual está intimamente associada às condições morfométricas locais, principalmente em regiões de relevo complexo (Cordeiro et al., 2011).

Na Figura 1, pode-se verificar a influência no perfil vertical do vento devido à mudança da rugosidade do valor z_{01} para z_{02} . A altura h é uma função da distância x . O perfil da velocidade do vento no terreno z_{02} é menor em relação ao perfil do mesmo vento vindo do terreno z_{01} devido ao aumento da rugosidade. Isso acarreta uma perda de energia do vento. A altura h é de fundamental importância no posicionamento de turbinas eólicas (Troen & Lundtang Petersen, 1989).

Na Tabela 1, podem-se observar os valores de rugosidades de algumas superfícies.

Tabela 1. Diferentes superfícies e seus valores de rugosidade, em mm (Mireille Sato, 2015)

Tipo de superfície	$Z_0(mm)$
Superfícies muito lisas, neve	0,01
Mar aberto e calmo	0,20
Mar com ondas	0,50
Gramados	8,00
Pastagens	10,00
Campos cultivados	50,00
Campos com algumas árvores	100,00
Florestas contínuas ou áreas com construções baixas	1000,00
Centros de cidades com edifícios altos	3000,00

Material e método

Localização

Arcoverde conta com cerca de 74.000 habitantes e fica a uma distância de 256 km de Recife. Situa-se na mesorregião do Sertão Pernambucano e está a uma altitude de 683 metros, com relação ao nível do mar. Além disso, Arcoverde apresenta as seguintes coordenadas geográficas: Latitude: $8^{\circ} 25' 10''$ Sul, Longitude: $37^{\circ} 3' 55''$ Oeste (Brasil, 2021).

Por outro lado, com aproximadamente 350.000 habitantes o município de Petrolina localiza-se na região nordeste do país, na mesorregião do São Francisco Pernambucano e encontra-se a cerca de 700 km de Recife e a 500 km de Salvador. Situado a 372 metros de altitude, Petrolina tem as seguintes coordenadas geográficas: Latitude: $9^{\circ} 23' 39''$ Sul, Longitude: $40^{\circ} 30' 35''$ Oeste (Cidade-Brasil, 2021).

A Figura 2 mostra um mapa do estado de Pernambuco com a localização das cidades supracitadas.



Figura 2. Mapa do estado de Pernambuco (Funase, 2021).

Obtenção dos Dados de Ventos

Os dados de velocidade [$m.s^{-1}$] e direção do vento [$^{\circ}$] foram coletados no portal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), no período de

01/01/2010 até 31/12/2020 (INMET, 2021). Os dados foram compilados e tratados utilizando o *software Excel*. Para a cidade de Arcoverde foram utilizados mais de 85.000 registros coletados tanto para a direção quanto para a velocidade do vento, com um aproveitamento de, aproximadamente, 88 % dos dados do INMET. Já para Petrolina, mais de 87.000 registros coletados foram tratados, tendo um aproveitamento próximo de 95% dos dados.

As medições foram registradas por estações automáticas a uma altura de 10 m, de uma em uma hora, a partir de 00h00min até 23h00min.

Direção dos Ventos

Para a determinação da direção do vento e geração da rosa dos ventos foi utilizado o *software WRPLOT* (Lakes, 2021). Foram considerados oito pontos para cada direção do vento: quatro pontos cardeais (Norte, Sul, Leste, Oeste) e quatro pontos colaterais (Nordeste, Sudeste, Noroeste e Sudoeste). Os pontos subcolaterais, por sua vez, localizam-se equidistante entre os pontos cardeais e os pontos colaterais (22,5 °), de maneira, a região Sudeste está localizada entre 112,5 ° e 157,5 ° na rosa dos ventos (Silva et al., 2013).

Dados estatísticos

A partir dos dados coletados e tratados, pode-se calcular a velocidade média e o desvio padrão da amostra. Para o cálculo da velocidade média foi utilizado a Equação 01 (Marinho, 2018):

$$V_m = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N V_i \quad (1)$$

onde N se trata do número de dados e V_i é velocidade do vento [$m \cdot s^{-1}$].

Para o cálculo do desvio padrão, por outro lado, foi utilizado a Equação 02:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_i - V_m)^2} \quad (2)$$

em que, V_m é velocidade média do vento [$m \cdot s^{-1}$].

O coeficiente de variação, em %, também foi calculado para cada amostra. Logo após, com o intuito de determinar as faixas de velocidade do vento que ocorreram com maior frequência, foram desenvolvidos histogramas, que mostram a frequência absoluta e acumulada dessas faixas.

Lei Logarítmica e Potencial eólico

Após o tratamento estatístico inicial, com altura de referência de 10 m, para as duas cidades, foi necessário estimar a velocidade do vento para outras alturas, ou seja, realizar a distribuição de

velocidade com a altura. Para isso, foi utilizada a Lei Logarítmica.

A Lei Logarítmica se trata de um modelo para determinação dessa distribuição de velocidade que considera o fato de que o escoamento na atmosfera é altamente turbulento. A determinação da velocidade do vento a certa altura ocorre a partir de duas expressões de perfil logarítmico: uma expressão para a altura desejada (z) e outra para a altura de referência (z_r). Essa Lei é precisa uma vez que considera o comprimento de rugosidade (z_0) em cada expressão logarítmica das alturas. A expressão matemática da Lei Logarítmica pode ser vista na Equação 03 (Silva, 1999):

$$V_{(z)} = V(z_r) \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (3)$$

em que $V_{(z)}$ é da velocidade na altura z , [$m \cdot s^{-1}$]; $V(z_r)$ se trata da velocidade na altura de referência z_r , [$m \cdot s^{-1}$]; z é a altura desejada [m]; z_r é altura de referência [m]; z_0 o comprimento da rugosidade total [m].

Uma vez determinada a distribuição de velocidade, a próxima etapa consistiu na determinação do potencial de geração de energia, denominado densidade de potência, cuja unidade de medida é dada por [$W \cdot m^{-2}$]. A Equação 04 mostra a densidade de potência (Marinho, 2018).

$$P = \frac{1}{2N} \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^N V_n^3 \quad (4)$$

onde N é número de dados; V a velocidade do vento [$m \cdot s^{-1}$]; ρ a densidade do ar [$kg \cdot m^{-3}$].

Ao nível do mar, a densidade do ar é de $1,18 kg \cdot m^{-3}$, para a temperatura de 25 °C. Contudo, como as cidades de Petrolina e Arcoverde estão acima desse nível, foi necessário dividir a densidade padrão ao nível do mar por um fator de correção (ToolBox, 2021). Portanto, a densidade do ar considerada para a cidade de Arcoverde foi de $1,0967 kg \cdot m^{-3}$, e para a cidade de Petrolina foi de $1,1331 kg \cdot m^{-3}$.

São consideradas adequadas para a implementação de um parque eólico, áreas em que a densidade de potência é superior a $200 W \cdot m^{-2}$ (Manwell et al., 2009).

Escolha do Aerogerador e Espaçamento entre Turbinas

A escolha de aerogerador comercial deu-se a partir da análise do potencial eólico calculado anteriormente. Escolheu-se um modelo de aerogerador que atendessem as alturas cuja densidade de potência fosse acima de $200 W \cdot m^{-2}$.

Quanto ao espaçamento entre as turbinas é de fundamental importância defini-lo, pois o rotor de uma turbina absorve parte da energia cinética do vento o que gera uma diminuição da energia aproveitada. Além disso, há o efeito da esteira helicoidal que afeta o controle do ângulo de passo da pá, aumenta as vibrações estruturais da turbina e gera processos de fadiga, que diminuem a vida útil e aumentam os custos de manutenção. Recomenda-se que a distância no eixo x seja de cinco a sete vezes o diâmetro do rotor e no eixo y seja de três a cinco vezes o diâmetro do rotor (SDPI-AGDI, 2014).

Potência Elétrica e Energia Fornecida

Para o cálculo da potência elétrica foi utilizada a Equação 05. A mesma difere da equação 04, pois nela é levado em consideração a área do rotor, o coeficiente aerodinâmico de potência e a eficiência do conjunto gerador/transmissão (Shamshirband et al., 2014).

$$P = \frac{1}{2N} \cdot A \cdot C_p \cdot \eta \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^N V_n^3 \quad (5)$$

em que P é a Potência elétrica $[W]$; N é o número de dados; V representa a velocidade do vento $[m \cdot s^{-1}]$; ρ é a densidade do ar $[kg \cdot m^{-3}]$; A é a área do rotor $[m^2]$; C_p representa o Coeficiente aerodinâmico de potência; η é a eficiência do conjunto gerador/transmissão.

Para o cálculo da energia fornecida basta multiplicar a potência elétrica por um valor de tempo em que o gerador ficaria ligado durante um ano.

Resultados e discussão

Direção do Vento

Sabendo que em Pernambuco predominam os ventos de Sudeste, tanto em Arcoverde quanto em Petrolina também prevaleceram os ventos na direção desse quadrante quase todo o ano. Em Arcoverde, cidade mais próxima da costa, podemos ver uma variação maior na direção do vento. Por outro lado, em Petrolina, cidade no sertão, o vento de Sudeste predomina com pouca amplitude de direção. A rosa dos ventos das cidades pode ser vista nas Figuras 3 e 4.

Avaliação do Potencial Eólico: Arcoverde

No que concerne à velocidade do vento, a Tabela 2 mostra a velocidade média das alturas calculadas. A média das velocidades foram $(3,40 \pm 1,44) m \cdot s^{-1}$ a 10 m, $(5,10 \pm 2,96) m \cdot s^{-1}$ a 50 m, $(6,00 \pm 3,48) m \cdot s^{-1}$ a 100 m e $(6,53 \pm 3,79) m \cdot s^{-1}$ a 150 m. O coeficiente de variação a 10 m foi de 42 %, o que destoou um pouco das demais alturas, que ficaram em 58 %.

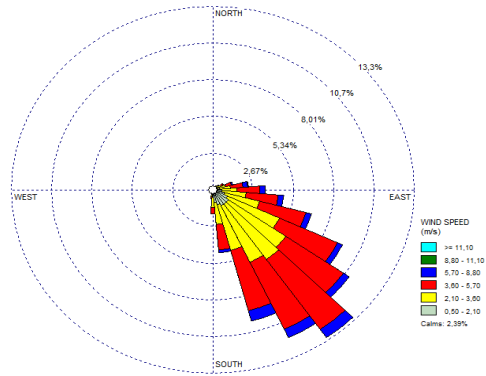


Figura 3. Rosa dos ventos em Arcoverde-PE.

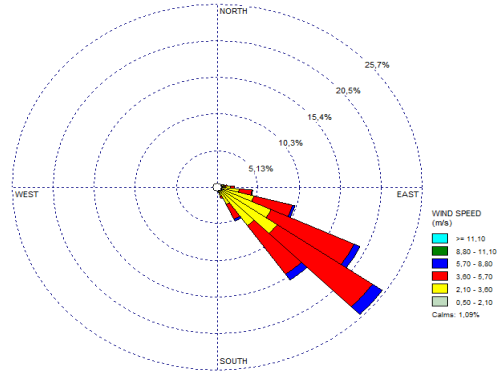


Figura 4. Rosa dos ventos em Petrolina-PE.

Tabela 2. Resultados da velocidade do vento em Arcoverde-PE

	10 m	50 m	100 m	150 m
Média	3,40	5,10	6,00	6,53
Mínima	0,10	0,17	0,20	0,22
Máxima	13,40	22,77	26,80	29,16
Desvio Padrão	1,44	2,96	3,48	3,79
Coeficiente de Variação	42%	58%	58%	58%

Para as velocidades do vento à 10 m e à 50 m de altura, observa-se o histograma de frequência e a frequência acumulada nas Figuras 5 e 6. Aproximadamente 80 % dos valores encontrados de velocidade estão abaixo $5 m \cdot s^{-1}$ à 10 m e abaixo de $8 m \cdot s^{-1}$ à 50 m de altura. À 10 m de altura, a faixa de velocidade do vento que predomina é entre $4 m \cdot s^{-1}$ e $5 m \cdot s^{-1}$, ao passo que à 50 m que mais aparece é entre $5 m \cdot s^{-1}$ e $6 m \cdot s^{-1}$.

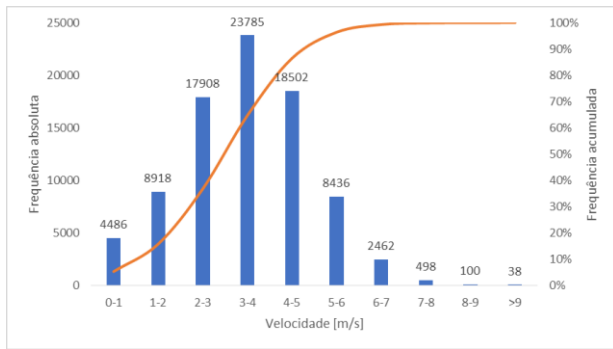


Figura 5. Frequências absoluta e acumulada da velocidade para altura de 10 m, na cidade de Arcoverde-PE.

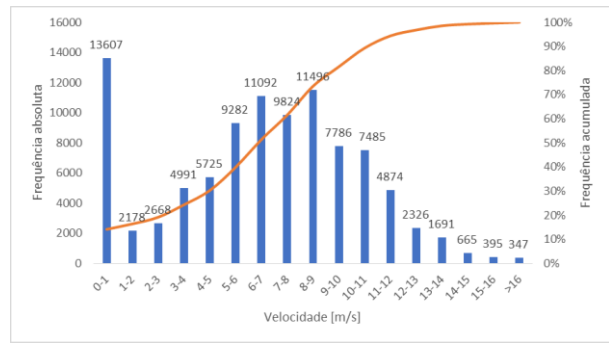


Figura 8. Frequências absoluta e acumulada da velocidade para altura de 150 m, na cidade de Arcoverde-PE.

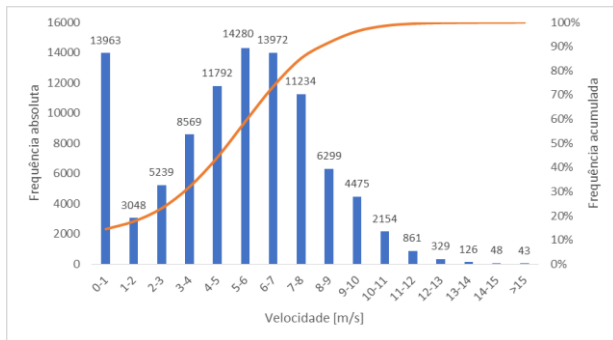


Figura 6. Frequências absoluta e acumulada da velocidade para altura de 50 m, na cidade de Arcoverde-PE.

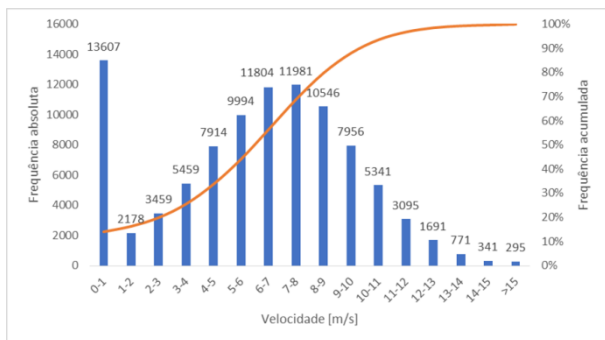


Figura 7. Frequências absoluta e acumulada da velocidade para altura de 100 m, na cidade de Arcoverde-PE.

Para as demais alturas extrapoladas, a faixa de velocidade predominante que justifica o aproveitamento energético (acima de $2,5 \text{ m.s}^{-1}$) foi entre 7 m.s^{-1} e 8 m.s^{-1} para altura de 100 m e entre 8 m.s^{-1} e 9 m.s^{-1} para altura de 150 m.

O potencial eólico para a cidade de Arcoverde pode ser visto na Tabela 3. Conforme os valores apresentados seria viável instalar um parque eólico com turbinas a partir de 100 m de altura do solo.

Tabela 3. Potencial eólico de Arcoverde - PE

	10 m	50 m	100 m	150 m
Potencial [$W.m^{-2}$]	29,28	143,60	234,26	301,74

Avaliação do Potencial Eólico: Petrolina

Referente a velocidade do vento na cidade de Petrolina, conforme pode ser visto na Tabela 4, a média das velocidades foram $(3,55 \pm 1,25) \text{ m.s}^{-1}$ a 10 m, $(5,72 \pm 2,46) \text{ m.s}^{-1}$ a 50 m, $(6,74 \pm 2,90) \text{ m.s}^{-1}$ a 100 m e $(7,33 \pm 3,15) \text{ m.s}^{-1}$ a 150 m. Por sua vez, o coeficiente de variação a 10 m foi de 35 % e o das demais alturas extrapoladas ficou em 43 %.

Tabela 4. Resultados de velocidades do vento em Petrolina-PE

	10 m	50 m	100 m	150 m
Média	3,55	5,72	6,74	7,33
Mínima	0,10	0,17	0,20	0,22
Máxima	10,20	17,33	20,40	22,20
Desvio Padrão	1,25	2,46	2,90	3,15
Coeficiente de Variação	35%	43%	43%	43%

Os histogramas de frequência e a frequência acumulada para as velocidades do vento a 10 m e a 50 m de altura podem ser vistos nas Figuras 7 e 8. Cerca de 80 % dos valores de velocidade estão abaixo de 4 m.s^{-1} à 10 m e abaixo de 7 m.s^{-1} à 50 m de altura. O range de velocidade do vento mais frequente é aquele entre 3 m.s^{-1} e 4 m.s^{-1} para uma altura de 10 m. Por outro lado, para uma altura de 50 m, a faixa de velocidade que mais aparece é entre 6 m.s^{-1} e 7 m.s^{-1} .

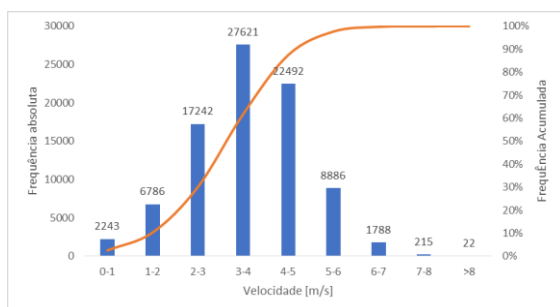


Figura 9. Frequências absoluta e acumulada da velocidade para altura de 10 m, na cidade de Petrolina-PE.

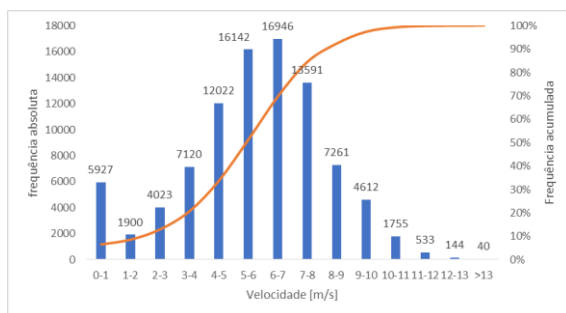


Figura 10. Frequências absoluta e acumulada da velocidade para altura de 50 m, na cidade de Petrolina-PE.

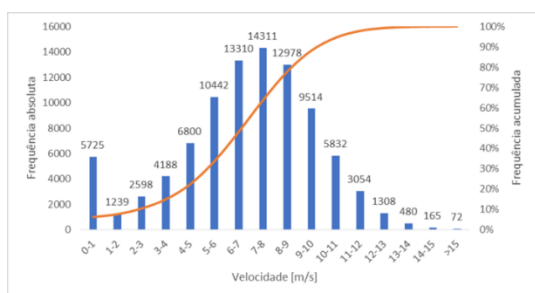


Figura 11. Frequências absoluta e acumulada da velocidade para altura de 100 m, na cidade de Petrolina-PE.

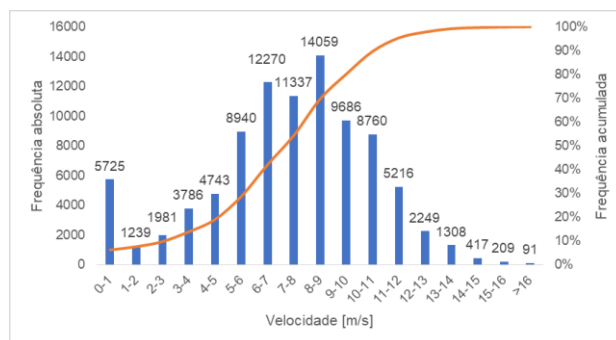


Figura 12. Frequências absoluta e acumulada da velocidade para altura de 150 m, na cidade de Petrolina-PE.

Para as demais alturas extrapoladas, os resultados para as faixas de velocidade predominantes foram similares aos da cidade de Arcoverde. As velocidades mais frequentes, que justificam o aproveitamento energético (acima de $2,5 \text{ m.s}^{-1}$), foram entre 7 m.s^{-1} e 8 m.s^{-1} para altura de 100 m e entre 8 m.s^{-1} e 9 m.s^{-1} para altura de 150 m.

O Potencial eólico para a cidade de Petrolina pode ser visto na Tabela 5. Diante dos valores apresentados, seria viável instalar um parque eólico com turbinas a partir de 100 m de altura do solo.

A título de comparação, no Farol de São Tomé (22 °Sul, 41 °Oeste), Rio de Janeiro, é mais vantajoso a instalação de aerogeradores para produção de energia eólica a partir dos 100 m de altura, em ambiente *onshore*, quando a potência eólica atinge $175,7 \text{ W.m}^{-2}$ (Marinho, 2018).

O mesmo estudo mostrou que os ventos atingiram um máximo de velocidade no período de 15 h e um mínimo no período de 09 h. As maiores médias de velocidade, foram observadas em ambiente *offshore* no Farol de São José Tomé (22 °Sul, 41 °Oeste) numa velocidade de $3,9 \text{ m.s}^{-1}$ e no Rio das Ostras (22,5 °Sul, 41,5 °Oeste) à $2,7 \text{ m.s}^{-1}$.

Tabela 5. Potencial eólico de Petrolina-PE

	10 m	50 m	100 m	150 m
Potencial [W.m ⁻²]	32,87	161,22	263,00	338,76

Avaliação da Energia fornecida – Arcoverde e Petrolina

Uma vez realizada a análise do potencial eólico para as duas cidades, percebeu-se que as alturas de 100 m e de 150 m foram as alturas que apresentaram o melhor potencial. Dessa maneira, foi

escolhido um modelo de aerogerador que sua altura do rotor fosse igual às alturas de melhor potencial. O modelo E-101 do fabricante Enercon foi o escolhido para o estudo. No Quadro 1 é possível verificar dos dados desse aerogerador.

Quadro 1. Dados do aerogerador escolhido

Dados do aerogerador	
Fabricante	ENERCON
Modelo	E-101 - IEC IIA
Altura do rotor p/ 100 m de altura [m]	99
Altura do rotor p/ 150 m de altura [m]	149
Potência nominal [kW]	3050
Diâmetro do rotor [m]	101
Área do rotor [m ²]	8012
Coeficiente de Potência	0,46
Eficiência do conjunto gerador/transmissão [%]	0,26

Uma vez escolhido o modelo do aerogerador, pode-se calcular o espaçamento entre as turbinas. Dessa forma, a distância lateral ficou de 505 m e a distância vertical ficou de 707 m. Para esse estudo, foram adotadas uma configuração com seis aerogeradores.

Sendo assim, a energia fornecida por um e por seis aerogeradores, para a cidade de Arcoverde, pode ser observada nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6. Energia fornecida por uma turbina na cidade de Arcoverde.

	100 m	150 m
Potência elétrica [MWh]	538,74	693,93

Tabela 7. Energia fornecida por seis turbinas na cidade de Arcoverde

	100 m	150 m
Potência elétrica [MWh]	3.232,42	4.163,61

Para a cidade de Petrolina, os valores podem ser encontrados nas Tabelas 8 e 9. É válido ressaltar que a energia renovável nas áreas urbanas se desenvolve com o consumo local e evitando a

transmissão a longa distância (G. Li et al., 2023).

Tabela 8. Energia fornecida por uma turbina na cidade de Petrolina

	100 m	150 m
Potência elétrica [MWh]	604,83	779,07

Tabela 9. Energia fornecida por seis turbinas na cidade de Petrolina

	100 m	150 m
Potência elétrica [MWh]	3.629,01	4.674,44

Conclusão

Os estudos apresentados nesse trabalho auxiliam na tomada de decisão sobre a instalação de parques para a produção de energia eólica nas cidades de Arcoverde e Petrolina.

Conforme esperado, os ventos apresentaram uma direção sudeste, havendo uma maior amplitude na direção para a cidade de Arcoverde.

Quanto à potência eólica projetada, ambas as cidades apresentaram ótimos resultados para alturas acima de 100 m. Para essa altura, Arcoverde apresenta um potencial de, enquanto Petrolina apresenta de 263,00 W.m⁻².

Para ambas as cidades, a faixa de velocidade – com maior frequência – que justifica o aproveitamento energético foi entre 7 m.s⁻¹ e 8 m.s⁻¹ para altura de 100 m e 8 m.s⁻¹ e 9 m.s⁻¹ para altura de 150 m.

Tanto Petrolina quanto Arcoverde, com uma configuração de 6 aerogeradores, conseguiriam fornecer energia para uma cidade de, aproximadamente, 3.000 habitantes.

Referências

- Al-Sanad, S., Parol, J., Wang, L., & Kolios, A., 2023. Design optimisation of wind turbine towers with reliability-based calibration of partial safety factors. *Energy Reports*, 9, 2548–2556. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.090>
- Alanis Ruiz, C., Kalkman, I., & Blocken, B., 2021. Aerodynamic design optimization of ducted openings through high-rise buildings for wind energy harvesting. *Building and Environment*, 202, 108028. Disponível:

- <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108028>
Azadani, L. N., 2023. Vertical axis wind turbines in cluster configurations. *Ocean Engineering*, 272. Disponível:
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113855>
- Brackmann, R., 2009. Avaliação do Potencial Eólico do Sul do Brasil. Disponível:
<https://doi.org/10.1038/132817a0>
- Brasil, C.-. (2021). Município Arcoverde.
<https://www.cidade-brasil.com.br/municipio-arcoverde.html>
- Camelo, H. do N., Lucio, P. S., & Leal Júnior, J. B. V., 2011. Previsão de velocidade do vento em termos de médias mensais e horárias a partir da combinação dos modelos Holt-Winters e Redes Neurais Artificiais. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 06, 1275–1291.
- Cidade-Brasil., 2021. Município de Petrolina.
<https://www.cidade-brasil.com.br/municipio-petrolina.html>
- Cordeiro, T. L., Assireu, A. T., Vijaykumar, N. L., Freitas, R. M. de, & Rosa, R. R., 2011. Heterogeneidade da rugosidade em terrenos complexos e implicações para o aproveitamento eólico. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 06, 1275–1291.
- Custódio, R. S., 2013. Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica.
- Da Silva, D. G., Lopes, R. P., & Carvalho, D. F. , 2013. Caracterização Do Potencial Eólico Em Seropédica (RJ). *Energia Na Agricultura*, 28(3), 185. Disponível:
<https://doi.org/10.17224/energagric.2013v28n3p185-192>
- da Silva, P. C., 1999. Sistema para Tratamento, Armazenamento e Disseminação de Dados de Vento. UFRJ.
- Dai, Y., Xie, F., Li, B., Wang, C., & Shi, K., 2023. Effect of blade tips ice on vibration performance of wind turbines. *Energy Reports*, 9, 622–629. Disponível:
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.12.092>
- Empresa de Pesquisa Energética, 2021. Brazilian Energy Balance 2021 year 2020. Brazilian Energy Balance 2021 Year 2020, 292.
<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>
- Empresa de Pesquisa Energética, 2022. Balanço energético nacional.
- Funase. (2021). Unidades Socioeducativas.
<https://www.funase.pe.gov.br/area-socioeducativa/unidades-socioeducativas>
- Gennitsaris, S., Sagani, A., Sofianopoulou, S., & Dedoussis, V., 2023. Integrated LCA and DEA approach for circular economy-driven performance evaluation of wind turbine end-of-life treatment options. *Applied Energy*, 339, 120951. Disponível:
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120951>
- Ha, Y. J., Ahn, H., Park, S., Park, J. Y., & Kim, K. H., 2023. Development of hybrid model test technique for performance evaluation of a 10 MW class floating offshore wind turbine considering asymmetrical thrust. *Ocean Engineering*, 272, 113783. Disponível:
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113783>
- Hesami, A., & Nikseresht, A. H., 2023. Towards development and optimization of the Savonius wind turbine incorporated with a wind-lens. *Energy*, 274, 127263. Disponível:
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127263>
- Hoehn, B., Darlow, R., Haac, R., Rand, J., & Kaliski, K., 2023. Effects of land-based wind turbine upsizing on community sound levels and power and energy density. *Applied Energy*, 338, 120856. Disponível:
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120856>
- INMET, 2021. Instituto Nacional de Meteorologia.
<https://portal.inmet.gov.br/>
- José Jackson Amancio Alves. (2011). Regionalização do Potencial Eólico no Estado do Ceará. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 06, 1275–1291.
- Lakes, 2021. WRPLOT View.
<https://www.weblakes.com/software/freeware/wrplot-view/>
- Lee, J., & Zhao, F., 2022. GWEC Global Wind Report. Global Wind Energy Council, 75.
- Li, G., Li, Y., Li, J., Huang, H., & Huang, L., 2023. Research on dynamic characteristics of vertical axis wind turbine extended to the outside of buildings. *Energy*, 272, 127182. Disponível:
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127182>
- Li, S., Caracoglia, L., & Møller-Madsen, J., 2023. Examining adequacy of the empirical Theodorsen function for wind turbine blade section-model aeroelasticity. *Journal of Fluids and Structures*, 118, 103843. Disponível:
<https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2023.103843>
- Lin, K., Xiao, S., Liu, H., & Zhou, A., 2022. Investigation on Dynamic Performance of Wind

- Turbines Using Different Scaling Methods in Wind Tunnel Tests. SSRN Electronic Journal, 284), 115961. Disponível: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4051708>
- Lutgens, F. K., & Tarbuck, E. J., 1995. The atmosphere: an introduction to meteorology (P. Hall (ed.); Sixth Edit).
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2009). Wind Energy Explained (WILEY (ed.); 2nd ed).
- Marinho, M. V., 2018. Avaliação do potencial eólico para geração de energia elétrica em Rio das Ostras e Farol de São Tomé - RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.
- Martins, F. R., Guarnieri, R. A., & Pereira, E. B., 2008. O aproveitamento da energia eólica. Revista Brasileira de Ensino de Física, 1304, 1–13. Disponível: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-55149126008&partnerID=MN8TOARS>
- Pacheco, C. S. G. R., & Santos, R. P., 2011. Parques Eólicos e Transformações Espaciais: uma Análise dos Impactos Socioambientais na Região de Santo Sé/BA. Revista Brasileira de Geografia Física, 06, 1275–1291.
- Paula, D. L. P. de, Cardoso, F. A. C., Cardoso, R. B., Cunha, G. de P. Q., & Vieira, E. M., 2011. Modelagem espacial da velocidade do vento a 50, 75 e 100 metros de altura para o estado de Minas Gerais, Brasil, empregando geoestatística. Revista Brasileira de Geografia Física, 06, 1275–1291.
- Pinto, L. I. C., Lima, F. J. L., Martins, F. R., & Pereira, E. B., 2017. Análise de agrupamento na otimização de futuras aplicações de modelagem numérica na estimativa e previsão de recurso eólico. Revista Brasileira de Geografia Física, 10(6), 1698–1711.
- Pinto, M. O., 2012. Fundamento da Energia Eólica (LTC (ed.)).
- Sato, M., 2005. Avaliação do potencial eólico em microescala de Cascavel e região. Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
- Sato, Mireille., 2015. Avaliação do potencial eólico em microescala de Cascavel e região (Vol. 151). Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Disponível: <https://doi.org/10.1145/3132847.3132886>
- SDPI-AGDI., 2014. Atlas eólico de Estado do Rio Grande do Sul.
- Shamshirband, S., Petković, D., Saboohi, H., Anuar, N. B., Inayat, I., Akib, S., Čojbašić, Ž., Nikolić, V., Mat Kiah, M. L., & Gani, A., 2014. Wind turbine power coefficient estimation by soft computing methodologies: Comparative study. Energy Conversion and Management, 81, 520–526. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.055>
- Silva, G. J. F. da, & Severo, T. E. A., 2012. Potencial/Aproveitamento de Energia Solar e Eólica no Semiárido Nordestino: Um Estudo de Caso em Juazeiro – BA nos Anos de 2000 a 2009. Revista Brasileira de Geografia Física, 003, 586–599.
- ToolBox, E., 2021. Air - Density and Specific Volume vs. Altitude.
- Troen, I., & Lundtang Petersen, E., 1989. European Wind Atlas (Risø National Laboratory (ed.)). [http://orbit.dtu.dk/en/publications/european-wind-atlas\(335e86f2-6d21-4191-8304-0b0a105089be\).html](http://orbit.dtu.dk/en/publications/european-wind-atlas(335e86f2-6d21-4191-8304-0b0a105089be).html)
- Verma, A., Yan, J., Hu, W., Castro, S. G., Jiang, Z., Shi, W., & Teuwen, J. J. E., 2023. A review of impact loads on composite wind turbine blades: impact threats and classification. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 178, 113261. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113261>
- Wang, Z., Li, G., Yao, L., Cai, Y., Lin, T., Zhang, J., & Dong, H., 2023. Intelligent fault detection scheme for constant-speed wind turbines based on improved multiscale fuzzy entropy and adaptive chaotic Aquila optimization-based support vector machine. ISA Transactions. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2023.03.022>
- Wu, M., Han, X., Tao, Y., & Pei, J., 2023. Lubrication reliability analysis of wind turbine main bearing in random wind field. Tribology International, 179, 108181. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.108181>
- Zaparolli, D., 2019. Ventos promissores a caminho. Pesquisa FAPESP. <https://revistapesquisa.fapesp.br/ventos-promissores-a-caminho/>
- Zhang, Z., Kuang, L., Zhao, Y., Han, Z., & Zhou, D., 2023. Numerical investigation of the aerodynamic and wake characteristics of a floating twin-rotor wind turbine under surge motion. Energy Conversion and Management, 283, 116957. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116957>