

Modelagem de potencial energético de aerogerador para edificação urbana com base em dados de sensoriamento remoto por satélite

Marcos Guedes do Nascimento¹, Raimundo Aprígio de Menezes Júnior², Bruno César Bezerra Nóbrega de Souza³ e Sérgio Costa de Mello³

¹Universidade Federal da Paraíba. Centro de Ciências Exatas e da Natureza. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio ambiente. *Campus I*. João Pessoa-PB, Brasil (CEP 58051-900). E-mail: marcosguedesmusical@gmail.com.

²Universidade Federal da Paraíba. Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Departamento de Engenharia de Energias Renováveis. *Campus I*. João Pessoa-PB, Brasil (CEP 58051-900).

³Universidade Federal da Paraíba. Centro de Ciências Exatas e da Natureza. Departamento de Física. *Campus I*. João Pessoa-PB, Brasil (CEP 58051-900).

Resumo. A poluição ambiental decorrente do uso de recursos não renováveis de energia e a limitação da disponibilidade destes recursos, somadas a necessidade de diversificação da matriz energética em razão do aumento sucessivo da demanda por energia, têm propiciado o desenvolvimento de diversos estudos em busca de soluções a estas questões. Inserida neste contexto, esta pesquisa apresenta a modelagem matemática de um sistema de conversão de energia eólica em elétrica a ser implementada no edifício sede do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, da Universidade Federal da Paraíba. Admite-se inicialmente um aerogerador hipotético sob a ação do vento em que o perfil de velocidade média no local entre os anos de 2015 a 2020 é obtido por meio da base de dados de sensoriamento remoto por satélite TERRACLIMATE. Os resultados alcançados neste estudo mostraram que os valores de corrente e potência, em termos gerais, variaram de 1,0 A até 4,0 A e de 20 W até 85 W durante os seis anos levados em consideração. Na média anual, a velocidade, a corrente e a potência assumiram valores de aproximadamente 4 m/s, 4 A e 75 W entre os meses de julho e outubro, que são os meses de maior incidência de ventos. Já entre os novembro e março foram registrados os menores valores destas grandezas, os quais se mostraram próximos de 3 m/s, 1,5 A e 20 W, respectivamente. Com uma produção de energia ininterrupta durante todos os dias e períodos do ano, o emprego do tipo de aerogerador adotado no estudo se mostrou viável, de tal maneira que caso seja garantida a instalação do mesmo em um lugar onde possa receber as correntes de ventos do local, possivelmente ele irá suprir total ou

Recebido
15/10/2021

Aceito
18/04/2022

Publicado
30/04/2022



Acesso aberto



ORCID

0000-0003-4551-8463
Marcos Guedes do
Nascimento

0000-0002-2311-1278
Raimundo Aprígio de
Menezes Júnior

parcialmente, a demanda por potência em dispositivos e equipamentos de baixo consumo energético a exemplo de lâmpadas e ventiladores.

Palavras-chave: Recurso renovável; Sustentabilidade; Aerogerador; Energia dos ventos; Geração de energia.

Abstract. *Modeling the energy potential of an wind turbine for urban building based of satellite remote sensing data.*

Environmental pollution resulting from the use of non-renewable energy resources and the limited availability of these resources, added to the need to diversify the energy matrix due to the successive increase in energy demand, have encouraged the development of several studies who seek solutions to these problems. Inserted in this context, this research presents the modeling of a system for converting Wind energy into electrical energy to be implemented in the head quarters building of the GraduateProgram in Development and Environment of the Federal University of Pará. Initially, a hypothetical wind turbine was admitted, in which the average speed at the site, between the years 2015 and 2020, is obtained through the remote sensing data base of the TERRACLIMATE satellite. The results achieved in this study showed that the current and power values, in general terms, ranged from 1.0 A to 4.0 A and from 20 W to 85 W during the six years considered. In the annual average, speed, current and power assumed values of approximately 4 m/s, 4 A and 75 W, between the months of July and October, which are those with the highest incidence of winds. Between November and March, the lowest magnitudes of these physical greatness were registered, which assumed values around 3 m/s, 1.5 A and 20 W, respectively. With na uninterrupted of energy production during all days and periods of the year, the use of the type of wind turbine adopted in the study proved to be viable, in such a way that if it is guaranteed its installation in a place where can receive Wind currents of the site, possibly it will in part or in whole supply the demand for power in devices and equipment with low energy consumption, such as lamps and fans.

Keywords: Renewable source; Sustainability; Wind turbine; Energy of winds; Power generation.

0000-0002-7533-6831

Bruno César Bezerra
Nóbrega de Souza

0000-0002-5149-4851

Sérgio Costa de Mello

Introdução

A modernidade modificou o estilo de vida da sociedade, bem como seus hábitos de consumo, resultando no atual homem tecnológico, que diferente do homem primitivo, não utiliza energia apenas para alimentação, mas também para comércio, moradia, indústria, agricultura e transporte. As Revoluções Industriais, em seu primeiro momento, trouxeram a dependência em relação ao carvão mineral como fontes de energia para as máquinas a vapor, enquanto que em um segundo instante, atrelou a industrialização a um modelo produtivo dependente energeticamente da eletricidade e dos combustíveis fósseis. Desde então, o acesso à energia elétrica tem proporcionado diversos benefícios, tanto a nível

residencial e comunitário, a exemplo de iluminação de casas, logradouros, praças e parques; quanto a nível empresarial, para realização de atividades de setores produtivos estatais ou privados, a exemplo da agricultura, da indústria e do comércio.

Em 1968, no contexto da abordagem acadêmica sobre preservação ambiental, destacou-se o Clube de Roma, um grupo formado por estudiosos de diversas áreas, os quais, após profundas discussões, produziram o Relatório chamado de “Os Limites do Crescimento”, que é considerado um marco em desenvolvimento e meio ambiente e, dentre os tantos assuntos abordados neste relatório, está inserido o tema produção e consumo de energia (Colombo, 2001). Nas décadas seguintes, o incentivo à aplicação de recursos renováveis e à diversificação da matriz energética mundial passaram a ser temáticas recorrentes em eventos internacionais para discussão acerca do meio ambiente. Presentemente, a qualidade de vida de uma nação tem como uma de suas principais variáveis, a matriz energética que possui para atendimento às demandas de sua população, pois a depender das fontes de energia por ela utilizadas, os seus cidadãos terão maior ou menor disponibilidade a certos serviços ou haverá maior ou menor grau de danos ambientais e para a saúde das pessoas (Carvalho, 2014; Goldemberg e Prado, 2010).

O desenvolvimento sustentável perpassa pela preocupação em atender as demandas da atual geração, sem comprometer o atendimento às necessidades daquelas que virão e, nessa perspectiva, a disponibilidade de fontes de energia alternativas e renováveis é primordial à obtenção deste modelo de desenvolvimento. Dentre as fontes renováveis existentes, a energia eólica vem sendo bastante utilizada. O emprego de aerogeradores tem se mostrado uma boa alternativa para formar parques de geração de energia, sendo responsável por atender parte da demanda energética mundial.

Diante da necessidade de se buscar formas sustentáveis de geração de energia às cidades e sabendo da possibilidade de utilização da energia mecânica dos ventos para geração de energia elétrica, este trabalho apresenta a modelagem de um sistema de conversão de energia eólica, por meio de dados de velocidade média dos ventos no local de estudo, obtidas em base consolidada de sensoriamento remoto por satélites. Serão discutidos a evolução do cenário da energia eólica nos últimos anos, no Brasil e no mundo; descritas as equações matemáticas utilizadas para obtenção dos valores de corrente e potência do modelo de aerogerador adotado; dados levantados da base de sensoriamento remoto TERRACLIMATE sobre velocidade dos ventos na cidade de João Pessoa, entre os anos de 2015 até 2020, no ponto de coordenadas geográficas onde fica instalado o Prédio do Programa de Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal da Paraíba (PRODEMA/UFPB); apresentação de gráficos de velocidade dos ventos, corrente e potência, a partir das informações adquiridas na base de dados e por meio do processamento dos cálculos para obtenção dos valores e; previsão da potência média mensal e anual possível de ser gerada pelo tipo de aerogerador considerado para este estudo.

Revisão de literatura

A energia eólica tem sido utilizada pela sociedade desde a antiguidade, para diversos fins, tais como a navegação, a moagem de grãos e o bombeamento de água. Há relatos de utilização dos primeiros cataventos para moer alimentos, na Pérsia, China e Oriente Médio, mesmo antes de Cristo. Foi na Idade Média, mais especificamente, a partir do Século XII, que os países da Europa começaram a utilizar estruturas maiores e mais robustas para construção de cata-ventos, tanto para moagem, quanto para bombeamento de água de poços artesianos.

Neste tempo, começaram a investir em embarcações maiores, principalmente para atender as demandas comerciais do Mercantilismo, período no qual, para o exercício das grandes navegações, exigia-se embarcações que aproveitassem cada vez mais a energia

advinda dos ventos. Em meio ao século XV, foi construído o primeiro cata-vento com multifuncionalidades, isto porque ele não se destinava apenas a moagem de alimentos, mas também ao controle e drenagem de excesso de água abaixo do nível do mar. Apesar de toda esta evolução na utilização de energia eólica para fins diversos, foi apenas no século XIX, em meio a primeira Revolução Industrial, no ano de 1888, que o estudioso Charles Bruch criou o primeiro catavento para geração de energia elétrica.

Desde então, esta ideia tem sido difundida, de tal modo que, atualmente, a energia eólica é uma das principais fontes renováveis, inclusive, em termos absolutos, apresentando números tão expressivos quanto os de geração de energia elétrica pelo uso de painéis fotovoltaicos. Assim como esta, a energia eólica foi tendo a sua utilização ampliada, à medida que a humanidade foi vivenciando crises energéticas sucessivas, após o período pós-segunda guerra. A Figura 1 indica a capacidade de geração de energia eólica no mundo de 2010 a 2020, destacando em cada barra a quantidade total de energia, em gigawatts (GW), gerada em um ano e o incremento dado a produção em relação ao ano anterior. Analisando a Figura 1, percebe-se que a geração de energia eólica passou de 198 GW, em 2010, para 743 GW, em 2020, totalizando um aumento de 375% em uma década (REN21, 2021).

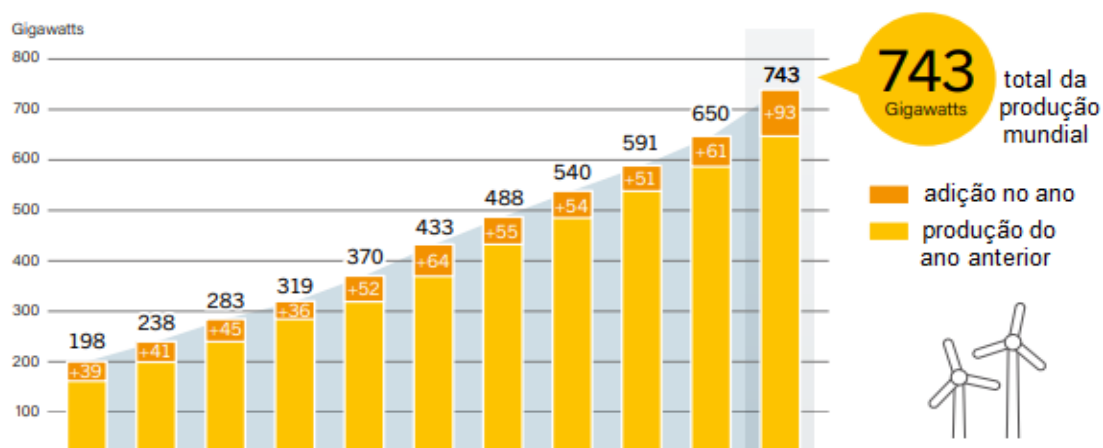


Figura 1. Capacidade global de energia eólica e adições anuais 2010-2020. Fonte: REN21 (2021).

Segundo a REN21 (2021), 11,2% de toda a energia produzida em escala mundial provém de recursos renováveis, sendo 2,4% correspondente a fração advinda da energia eólica. Apesar de não crescer na mesma proporção que a energia solar, também demonstra estar crescendo ano após ano, seguindo uma tendência ascendente em relação à quantidade de energia produzida. No contexto brasileiro, a energia eólica corresponde a cerca de 10,9% da matriz energética, devendo chegar a 13,6% em 2025 (Brasil, 2021). A Figura 2 expressa a divisão percentual da matriz energética brasileira em relação às diversas fontes de energia que a compõem. Segundo os dados nela expressos, a energia eólica representava 6,1% da matriz energética em 2016, havendo a previsão de chegar a 12% no ano de 2024 (Newtech, 2016). Destaca-se, porém, o fato de que em 2021 ela chegou a quase 11%, podendo atingir a marca prevista para 2024 ainda este ano ou em 2022 (Brasil, 2021).

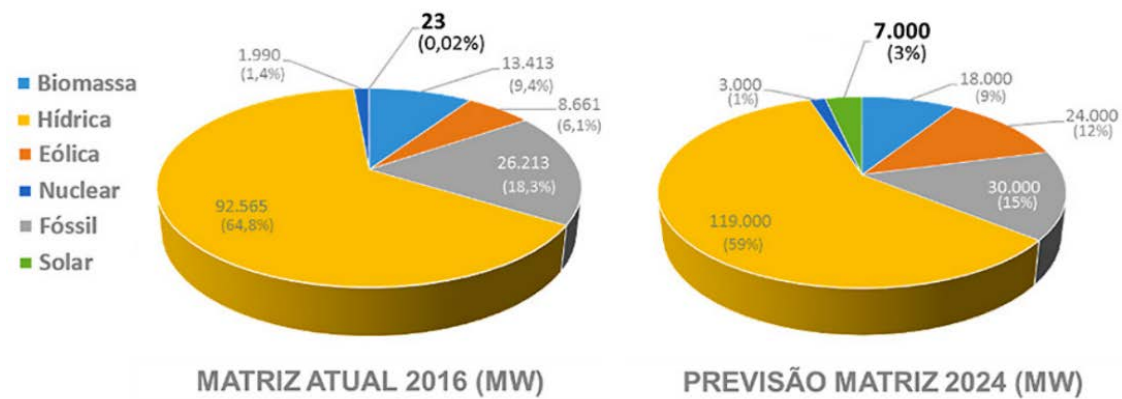


Figura 2. Participação renovável no consumo global de energia entre 2009 e 2019. Fonte: Newtech (2016).

Para o estudo de aerogeradores de pequeno porte, considera-se o ar como sendo um fluido não viscoso, de densidade constante, escoamento sem turbulência, ou seja, a velocidade de cada partícula de ar tem o mesmo sentido e intensidade em um ponto qualquer de uma seção transversal, de forma que ocorre a conservação de energia e, deste modo, os únicos fatores que irão influenciar na mudança de nível de energia do sistema são a diferença de pressão antes e depois o rotor do aerogerador e a área de seção transversal deste (Picolo et al., 2014). O valor da energia cinética coincide com o da energia mecânica total do sistema, pois não há variação de energia potencial no deslocamento da massa de ar antes e depois da seção transversal do rotor, sendo assim:

$$E_{mec} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (1)$$

Onde m , neste caso, é a massa de ar em deslocamento e v é a velocidade do ar. A potência média é a taxa de variação de energia por unidade de tempo. Neste caso, para energia mecânica E_{mec} da massa m em questão, temos:

$$P_{total} = \frac{E_{mec}}{\Delta T} = \frac{1}{2} \frac{m \cdot v^2}{\Delta T} = \frac{1}{2} \frac{\rho \cdot V \cdot v^2}{\Delta T} = \frac{1}{2} \frac{\rho \cdot A \cdot h \cdot v^2}{\Delta T} \Rightarrow P_{total} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2)$$

A letra A da equação (2) representa o valor da área de seção transversal, sendo a potência, tanto proporcional a ela, quanto ao cubo da velocidade. Por isto, a viabilidade da geração de energia elétrica a partir da energia eólica, só é atendida em lugares nos quais há fluxo rápido e constante de vento. Parte desta energia não é absorvida pelo aerogerador, de modo que, teoricamente, o máximo de potência útil que pode ser extraído por um sistema eólico equivale a 59,3% da potência total disponível (Picolo et al., 2014). Este rendimento é denominado coeficiente de potência C_p e depende do coeficiente de velocidade específica λ e do ângulo da lâmina das hélices do aerogerador β , conforme pode ser visualizado na Figura 3.

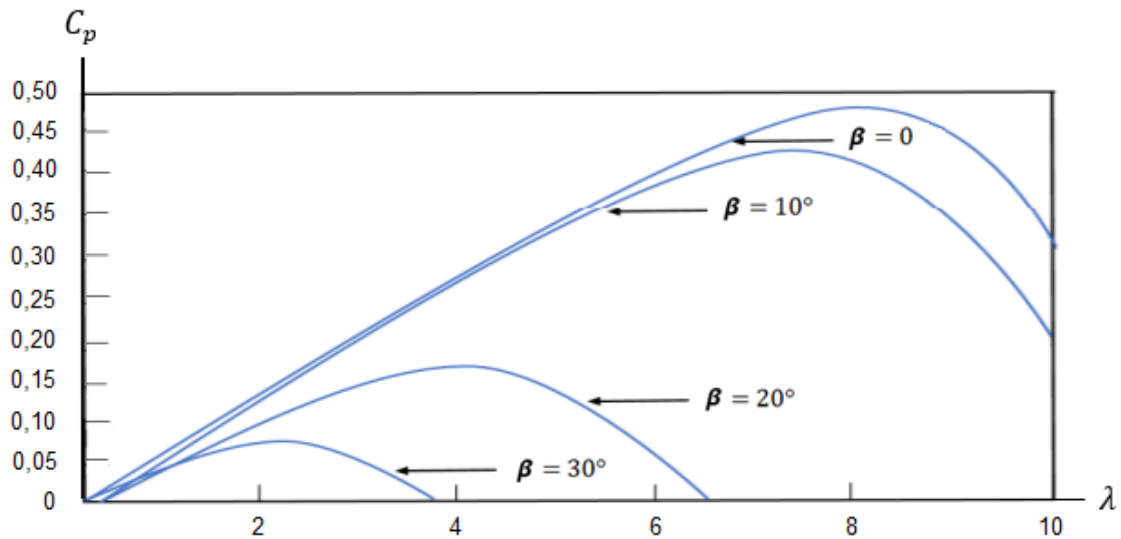


Figura 3. Variação de C_p em função de λ e β . Fonte: Fortmann (2015).

A expressão que calcula o coeficiente C_p é dada pela razão entre a potência mecânica extraída pelo conversor, que é a potência útil e a potência mecânica da corrente de ar antes de chegar as hélices, que é a potência total (Castro, 2009).

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{total}}} \quad (3)$$

$$C_p = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{total}}} \Rightarrow P_{\text{útil}} = P_{\text{total}} \cdot C_p \Rightarrow P_{\text{útil}} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_p \cdot v^3 \quad (4)$$

Uma parte da energia mecânica que havia no início é responsável pela potência útil utilizada para girar o rotor. Como a massa de ar é a mesma antes e depois do fluido passar pelo aerogerador, necessariamente há diminuição da velocidade de escoamento, devido a diminuição da energia cinética. A equação de continuidade indica que a velocidade e a área são inversamente proporcionais, logo, a redução da velocidade implicará no aumento da área de seção transversal da massa de ar que passa pelas hélices do aerogerador, conforme representado na Figura 4.

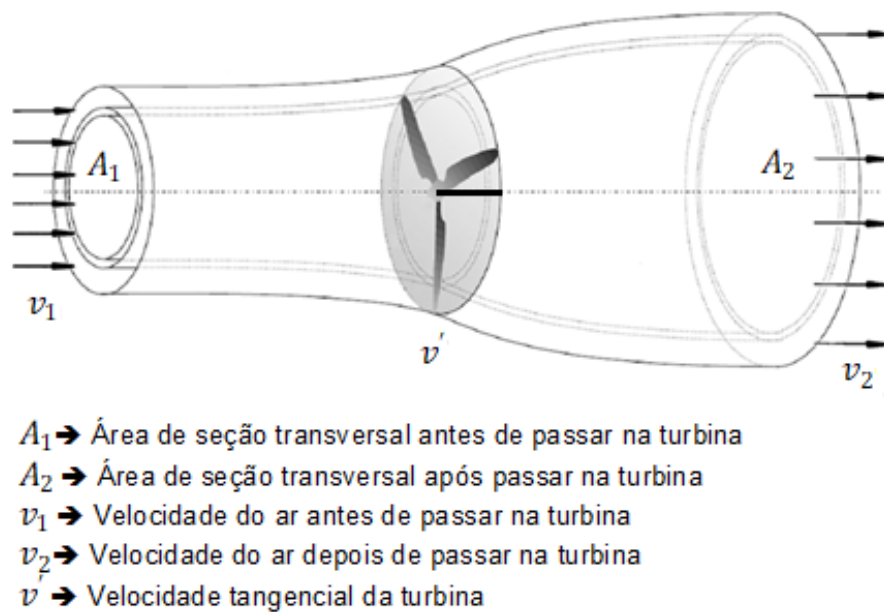


Figura 4. Fluxo de corrente do ar antes e depois do rotor. Fonte: Picolo et al. (2014).

Uma variável importante é o coeficiente adimensional conhecido por velocidade específica ou relação de velocidade (tip-speed ratio), correspondente a razão entre velocidade linear da extremidade da pá (v') e a velocidade do vento ($v_1 = v$), com R em metros, ω em radianos por segundo e v em metros por segundo.

$$\lambda = \frac{v'}{v} = \frac{\omega \cdot R}{v} \Leftrightarrow v = \frac{\omega \cdot R}{\lambda} \quad (5)$$

Para o valor ótimo do coeficiente de relação de velocidade λ_{max} , tem-se a potência mecânica efetiva ótima. Relacionando as equações (4) e (5), a referida potência pode ser escrita como sendo:

$$P_{\text{útilótima}} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot A \frac{\omega^3 \cdot R^3}{\lambda_{max}^3} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot \pi \cdot R^2 \frac{\omega^3 \cdot R^3}{\lambda_{max}^3}$$

$$P_{\text{útilótima}} = \frac{C_p}{2 \cdot \lambda^3} \pi \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot R^5 \quad (6)$$

Na maioria das vezes, os sistemas eólicos trabalham com velocidades variáveis. Por isso, é preciso atentar para as variações do coeficiente de potência C_p em decorrência das mudanças sofridas pelo coeficiente de velocidade específica λ , estando a relação entre estes coeficientes expressos na Figura 5. O gráfico à direita da figura mostra como a

potência elétrica de saída da turbina eólica varia por motivo da mudança da velocidade do vento.

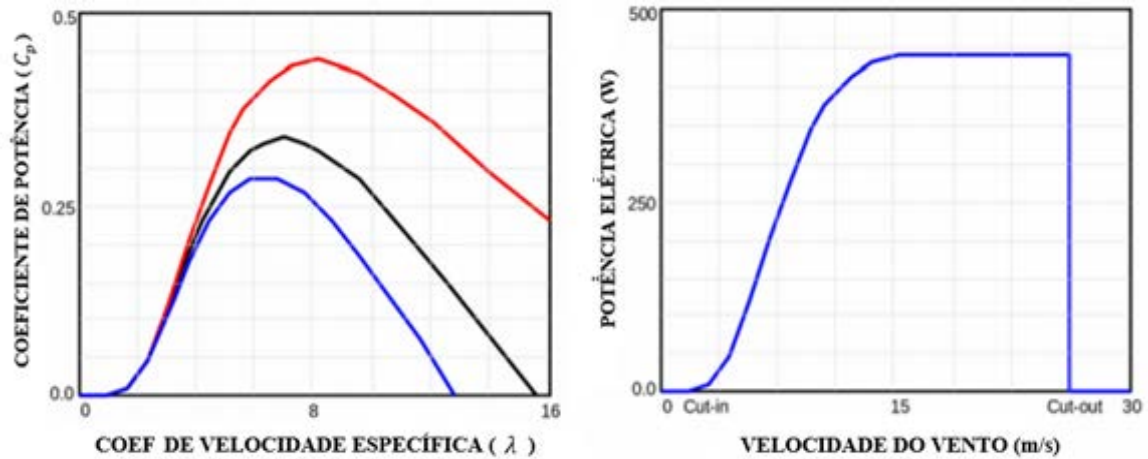


Figura 5. À esquerda (gráfico C_p versus λ), à direita (gráfico de P versus v). Fonte: SANTOS; REIS; JUNIOR, 2014

A curva de potência elétrica em função da velocidade do vento, descrita no gráfico contido no lado direito da Figura 5, é característica do funcionamento de turbinas eólicas, mostrando a velocidade de ativação (v_{cut-in}) do sistema. Em seguida, nota-se que a potência modifica proporcionalmente ao cubo da velocidade até que esta atinja o seu valor nominal. Neste momento, o sistema atinge sua máxima capacidade de geração de energia por unidade de tempo, denominada Potência Nominal. A velocidade do vento continua a aumentar e, ao chegar em certo valor, chamado de velocidade de corte ($v_{cut-out}$), o rotor para de funcionar a fim de evitar danos a estrutura do dispositivo (Dupont et al., 2017).

A potência mecânica disponibilizada por um fluxo de corrente de ar em uma turbina eólica é a mesma definida na equação (4), inclusive nos casos em que a velocidade é variável, podendo ser assim escrita:

$$P_{\text{útil}} = P_{\text{mec}} = \frac{dE_{\text{mec}}}{dt} = \frac{d\left(\frac{1}{2}m \cdot v^2\right)}{dt} = \frac{1}{2}C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (7)$$

Com os coeficientes numéricos c_1 a c_6 assumindo os valores 0,517; 116; 0,4; 5; 21 e 0,0068 na equação abaixo, pode-se afirmar que a mesma é utilizada para calcular o coeficiente C_p em boa parte de turbinas eólicas (Slootweb et al., 2001), ficando descrita assim:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \cdot \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \cdot \beta - c_4\right) \cdot e^{-\left(\frac{c_5}{\lambda_i}\right)} + c_6 \cdot \lambda \quad (8)$$

O valor de λ_i é obtido pela expressão (Slootweb et al., 2001):

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}} \quad (9)$$

Desta maneira, o torque produzido pelo rotor é expresso, portanto, pela a equação:

$$\tau = \frac{P_{mec}}{\omega} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{v^3}{\omega} \quad (10)$$

Materiais e métodos

O estudo foi desenvolvido através do uso da ferramenta de computação em nuvem Earth Engine Platform (EE) para obtenção de dados acerca da velocidade média mensal dos ventos, em metros por segundo, contidas na base de sensoriamento remoto por satélite TERRACLIMATE, no período de 2015 a 2020, no município de João Pessoa, mais especificamente, no ponto de coordenadas geográficas (-7,139498486481094, -34,8439730892816), onde estão localizadas as instalações do PRODEMA/UFPB.

A partir das informações de velocidade dos ventos no local de estudo, foram empregadas as equações (1) a (10) para cálculo da corrente e da potência do sistema eólico. Em seguida, foram calculados os valores de corrente e potência média total para cada mês e ano e ao final, traçou-se o gráfico com a média dos seis anos, expressando nele a curva que descreve a média da corrente e potência para um ano qualquer.

Resultados e discussão

Nos gráficos das Figuras 6 e 7, a curva azul descreve a variação da velocidade dos ventos, de 2015 a 2020, multiplicada pelo fator 100. Já para obtenção do valor da corrente, deve-se considerar os números contidos no eixo vertical referentes a curva vermelha e dividi-los por 100. A variação da potência no decorrer dos seis anos, por sua vez, é concebida pela curva verde, estando multiplicada pelo fator 10. Sendo assim, ao dividir por 10 certo valor da abscissa correspondente a curva verde, obtém-se o valor da potência no ponto.

A Figura 6 traz no eixo das ordenadas, os valores da corrente, da potência e da velocidade dos ventos no transcorrer dos seis anos considerados, período de tempo representado no eixo horizontal. Percebe-se que, em geral, o valor da corrente variou entre 1,0 A e 4,0 A durante este período, chegando a apresentar valores atípicos, como em julho e setembro de 2017, quando atingiu as marcas de 7 A e 6,5 A, respectivamente, ou como em março de 2020, quando a corrente foi quase nula, assim como a potência.

Os menores valores de corrente e potência ocorreram entre os meses de janeiro e maio e nos meses de novembro e dezembro de cada ano. Já os valores de maior intensidade destas grandezas se deram entre os meses de junho e setembro de cada ano. A potência elétrica gerada variou, comumente, entre 20 W e 85 W. Em julho e setembro de 2017, porém, ocorreu um pico na curva de potência, cujos valores atingiram as marcas de 160 W e 140 W, nesta ordem; houve ainda um vale na curva de potência no mês de março de 2020, a qual ficou em menos de 5 W, todavia, certamente são valores fora dos parâmetros habituais.

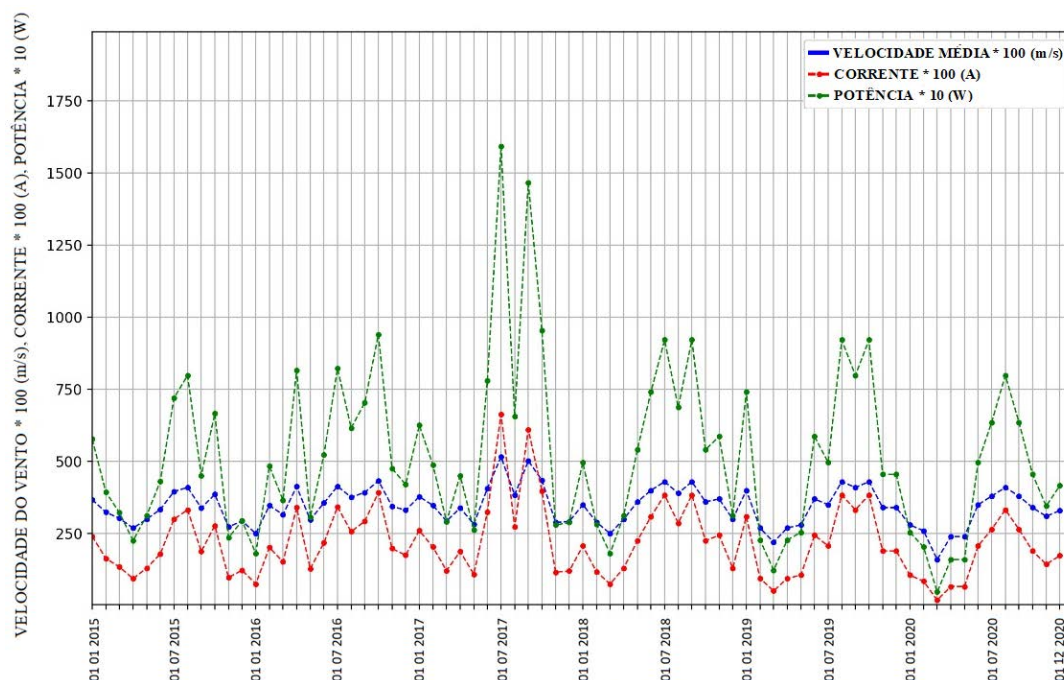


Figura 6. Velocidade média dos ventos, corrente e potência obtidas por meio de cálculos matemáticos e dados da base TERRACLIMATE_João Pessoa_2015 a 2020.

A Figura 7 traz no eixo das ordenadas, os valores referentes as médias mensais da corrente, da potência e da velocidade dos ventos, em um ano qualquer, utilizando os valores correspondentes a cada mês nos anos de 2015 a 2020, ou seja, o valor da velocidade média do vento indicado no mês de julho, corresponde à média aritmética dos seis meses de julho, de 2015 e 2020, assim foi feito para o estabelecimento da velocidade nos demais meses.

Analisando a Figura 7, vimos que a velocidade, a corrente e a potência assumiram valores maiores entre os meses de julho e outubro, chegando a, aproximadamente, 4 m/s, 4 A e 75W, nesta ordem. Ao contrário disto, os valores destas grandezas se apresentaram menores durante o verão, entre novembro e março, medindo, aproximadamente, 3 m/s, 1,5 A e 20W, respectivamente.

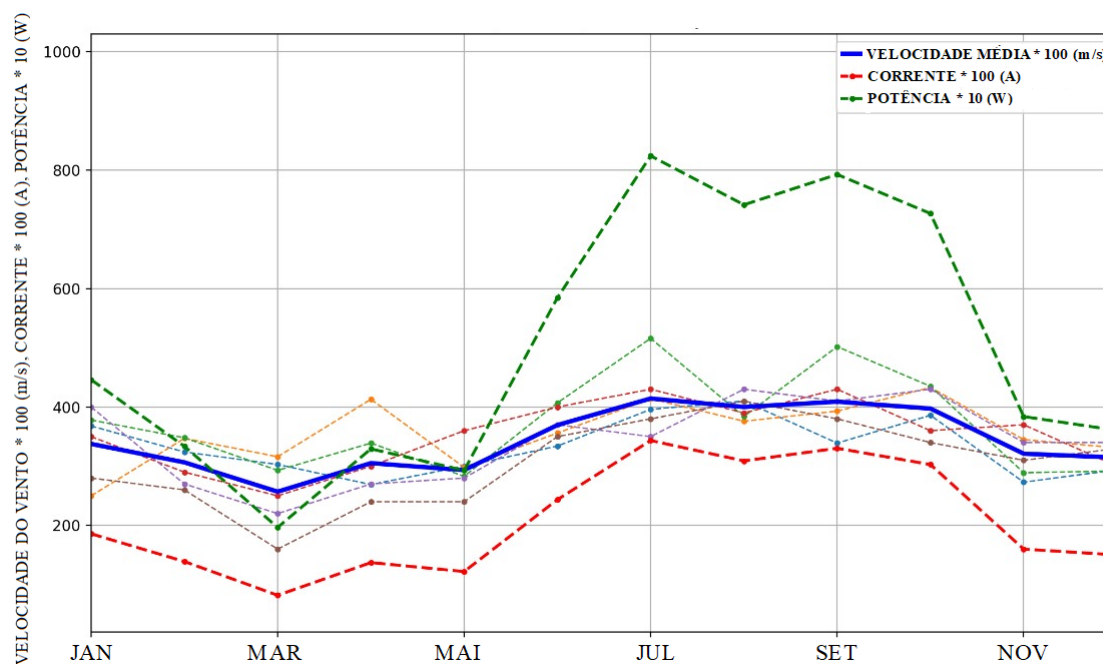


Figura 7. Velocidade, corrente e potência média anual com uso de dados da base TERRACLIMATE_João Pessoa_2015 a 2020.

Considerações finais

De acordo com a análise dos dados que foram coletados, ficou evidenciado que é viável o emprego do modelo de aerogerador adotado para transformar energia eólica em energia elétrica no Prédio do Programa de Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal da Paraíba, situado no Município João Pessoa, desde que sejam adotadas as medidas necessárias para que o aerogerador seja instalado a uma altura tal que a vegetação existente nos arredores da edificação não impeçam da corrente de ar chegue até as hélices.

Destaca-se o fato no decorrer do ciclo anual, há ocorrência de correntes de ventos no litoral paraibano suficientes para fazer com que haja geração de energia durante 24 h por dia em todos os dias do ano. Apesar de ser grande a quantidade de energia gerada, a produção é perene e pode ser armazenada em baterias a fim de suprir parte do consumo da energia elétrica do local, a exemplo de lâmpadas e dispositivos eletrônicos de baixo consumo de energia.

Para continuação da pesquisa, sugere-se a instalação de um aerogerador na edificação com o propósito de fazer o levantamento de dados de geração de energia elétrica pelo uso do mesmo, para que após isto, possa se fazer a comparação entre o que prever a teoria com o que se constata na prática. Outra etapa de estudo desta temática consiste na medição do fluxo de carga entre o aerogerador e as baterias e entre estas e os equipamentos de corrente contínua ou inversor, no caso de conversão de corrente contínua para corrente alternada; se assim for, é importante medir o fluxo de carga do conversor aos equipamentos de corrente alternada.

O aprofundamento neste campo de pesquisa não é apenas uma questão possível de ser feita, mas também necessária, pois é urgente que se encontre soluções para diminuir a demanda energia proveniente das redes de transmissão convencionais. A conversão de energia eólica em elétrica tem sido um dos meios de geração de energia mais utilizados

para produzi-la em pequena, média e larga escala, sendo destinada ao uso na indústria, no comércio, na agricultura e nas residenciais. O litoral paraibano é uma região propícia à utilização deste tipo de recurso e, por isto, esta pesquisa precisa ter continuidade, trazendo benefício à comunidade acadêmica e à sociedade em geral.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

- Brasil. Entenda como a matriz elétrica brasileira está mudando: Usinas híbridas, que utilizam mais de um tipo de fonte de geração de energia elétrica, têm ganhado espaço. Governo Federal, Brasília, Energia Elétrica, 30 ago. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/08/entenda-como-a-matriz-eletrica-brasileira-esta-mudando>>. Acesso em: 06 set. 2021.
- Carvalho, J. F. Energia e sociedade. **Estudos Avançados**, v. 28, n. 82, p. 25-39, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142014000300003>
- Castro, R. M. G. **Energias renováveis e produção descentralizada**: introdução à energia eólica. 4. ed. Lisboa: Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 2009.
- Colombo, U. The Club of Rome and sustainable development. **Futures**, v. 33, n. 1, p. 7-11, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0016-3287\(00\)00048-3](https://doi.org/10.1016/S0016-3287(00)00048-3)
- Dupont, E.; Koppelaar, R.; Jeanmart, H. Global available wind energy with physical and energy return on investment constraints. **Applied Energy**, v. 209, p. 322-338, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.085>
- Fortmann, J. **Modeling of wind turbines with doubly fed generator system**. Duisburg: Springer Vieweg Verlag, 2014.
- Goldemberg, J.; Prado, L. T. The “decarbonization” of the world’s energy matrix. **Energy Policy**, v. 38, n. 7, p. 3274–3276, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.040>
- Newtech, I. Energia solar fotovoltaica: a revolução energética já começou no Brasil. **Portal solar**, São Paulo, 10 jan. 2016. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/energia-solar-fotovoltaica-a-revolucao-energetica-ja-comecou-no-brasil.html>>. Acesso em: 12 ago. 2021.
- Piccolo, A. P.; Bühler, A. J.; Rampinelli, G. A. Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 4, p. 4306-1-4306-13, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172014000400007>
- REN21 - Renewables 2021. **Global status report**. 2021. Disponível em: <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2021.

Slootweg, J. G.; Polinder, H.; Kling, W. L. Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 18, n. 4, p. 516-524, 2003. <https://doi.org/10.1109/TEC.2003.816593>



Informação da Licença: Este é um artigo Open Access distribuído sob os termos da Licença Creative Commons Attribution, que permite uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.