

Influência da velocidade do vento na magnitude da potência extraída da Turbina Eólica

Bruno Seiti Fudo

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Sertãozinho, SP, Brasil.

Marcos Alves Fontes

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Sertãozinho, SP, Brasil.

Resumo: A geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis já é uma realidade no mundo como também no Brasil. A busca por alternativas além das usinas hidrelétricas se faz tão necessária atualmente, principalmente devido à escassez dos recursos hídricos existentes. A energia eólica se torna uma opção por ser considerada uma fonte de energia relativamente barata, inesgotável e limpa. O entendimento e a compreensão das variáveis que permitem maximizar a potência extraída das turbinas e, conseqüentemente, a eficiência das usinas eólicas é importante para que este tipo de recurso possa ser utilizado cada vez mais com custos cada vez menores. Para tanto, este projeto estudou a influência da velocidade do vento, principal fonte da energia eólica, nos valores de potência extraída das turbinas. Uma análise prática utilizando uma bancada didática de energias renováveis foi realizada para comprovar a teoria que estabelece que a velocidade do vento interfere na potência extraída da turbina em uma relação cúbica. Resultados mostraram que a velocidade do vento interfere consideravelmente na potência da turbina eólica, onde para maiores velocidades maiores potências extraídas. Devido à pequena faixa de velocidades testadas na bancada didática, por conta de uma limitação da própria bancada de teste, a relação entre a velocidade e a potência, que teoricamente deveria ter uma relação cúbica, pode ser representada, neste pequeno intervalo de faixa de velocidade, por uma função linear.

Palavras-chave: Energias renováveis. Bancada didática. Avaliação prática.

Abstract: The generation of electric power from renewable sources is already a reality in the world as well as in Brazil. The search for alternatives to replace the hydroelectric power plants is so necessary nowadays, mainly due to the scarce existing water resources. Wind power becomes an option because it is considered a relatively cheap, inexhaustible, and clean energy source. The understanding of the variables that allow maximizing the power extracted from the turbines and, consequently, the efficiency of a wind power station is important so that this type of resource can be used more and more with diminishing costs. Therefore, this project studied the influence of wind speed, the main source of wind power, on the power values extracted from the turbines. A practical analysis using a renewable energies didactic bench was carried out to prove, according to theory, that the wind speed interferes with the power extracted from the turbine in a cubic relation. Results showed that the wind speed significantly interferes in the wind turbine power, where for high speeds higher extracted powers. Due to the small speed range tested on the didactic bench, due to a test bench limitation itself, the relationship between speed and power, which theoretically should have a cubic relationship, can be represented in this small speed range, by a linear function.

Keywords: Renewable energy. Test Bench. Practical assessment.

1. INTRODUÇÃO

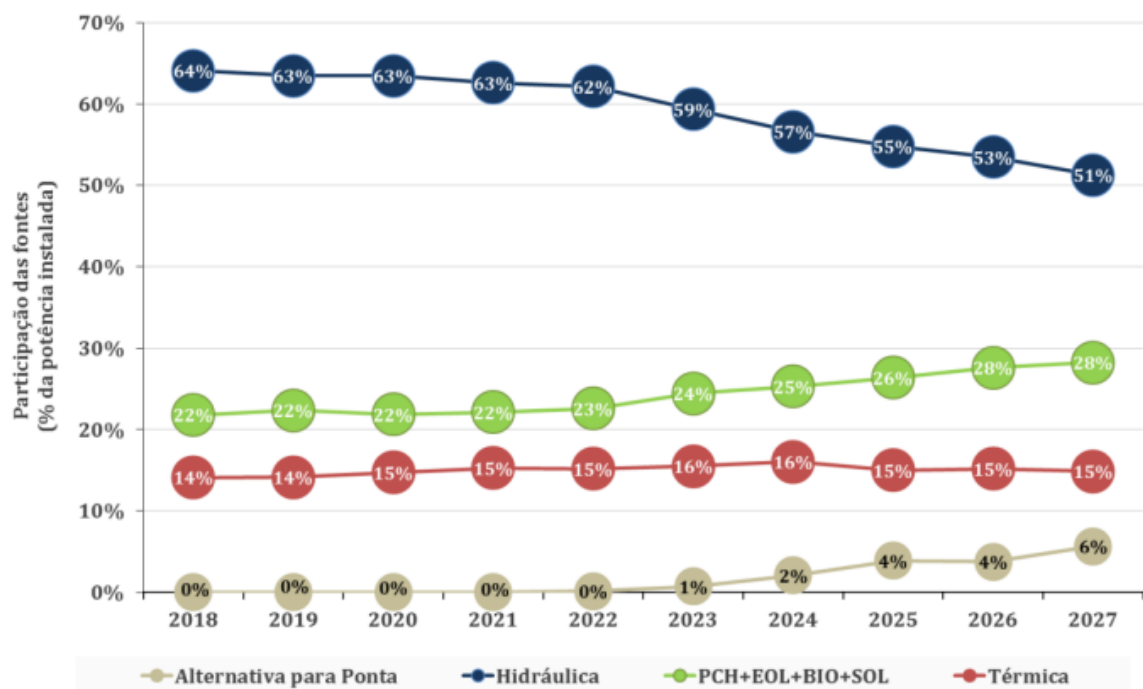
O objetivo principal deste trabalho é verificar na prática, por meio de ensaios em uma bancada didática de energia eólica, a existência da relação cúbica entre a velocidade do vento e a potência extraída do aerogerador, para validar a equação que relaciona estas duas variáveis, de entrada e de saída do sistema, envolvidas na geração de energia eólica.

A geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, como a energia eólica, está em constante crescimento no mundo nos últimos anos, e atualmente encontra-se em plena expansão no Brasil. De acordo com Pinto (2013), nos anos de 1970 vieram à tona duas grandes preocupações relacionadas ao consumo e à geração de energia elétrica mundo: a primeira relacionada ao constante crescimento de demanda de eletricidade no planeta e a segunda relacionada aos impactos ambientais causados pelas fontes de combustíveis fósseis (óleo, gás natural, carvão etc.) existentes para geração de energia.

Diante deste fato, surgiu então o interesse em utilizar as energias renováveis como soluções para essas preocupações. As energias renováveis como a energia hidráulica, já bastante explorada no Brasil, energia solar, eólica, biomassa e de hidrogênio são consideradas limpas e abundantes e terão cada vez mais participação na matriz energética mundial (FADIGAS, 2011; CUNHA *et al.*, 2019). A não emissão de alguns poluentes na atmosfera terrestre por parte da geração renovável representa uma vantagem significativa comparada às usinas fósseis, por exemplo (PINTO, 2013; PINHEIRO *et al.*, 2021).

A Figura 1 apresenta uma estimativa de participação das fontes de geração de energia elétrica ao longo dos anos, onde é possível verificar uma expectativa de aumento e participação das energias renováveis na matriz energética brasileira.

Figura 1 - Estimativa da matriz elétrica brasileira



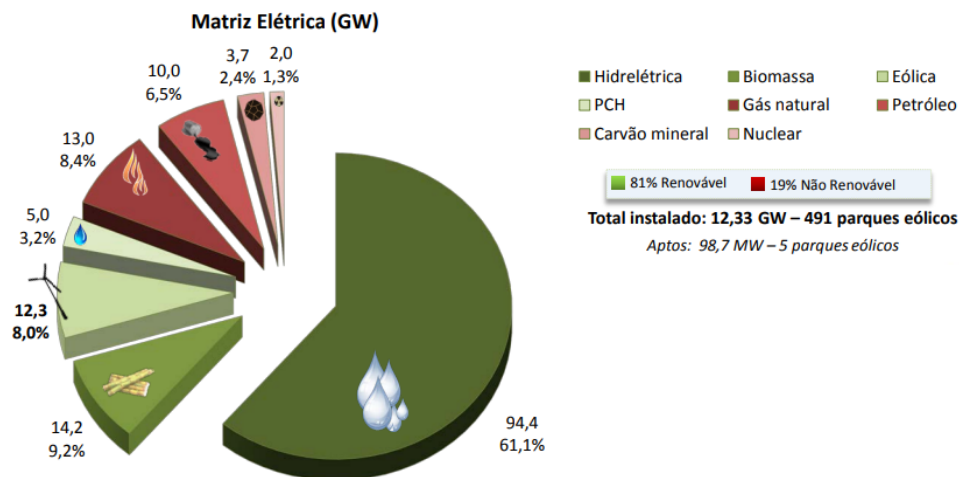
Fonte: ANEEL (2019, p8).

De acordo com Aneel (2002), denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre através da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominada aerogeradores, para a geração de energia elétrica. A energia eólica, assim como a energia hidráulica, é utilizada há milhares de anos com as mesmas finalidades de, por exemplo, bombeamento de água, moagem de grãos e outras aplicações que envolvem a energia mecânica (ANEEL, 2002).

Entre as fontes de energia renováveis existentes, a eólica ganhou certo destaque mundial principalmente pela boa experiência ocorrida em países como Dinamarca e Alemanha. Porém somente a partir dos anos 1980, auxiliado pelo intenso desenvolvimento tecnológico, o nível de potência alcançou rapidamente a faixa dos megawatts, e os parques eólicos cresceram em um patamar considerável (PINTO, 2013). Para Tratz et al. (2019) a energia eólica é uma das mais importantes fontes de energia renovável na atualidade. Diversos países, inclusive o Brasil, estão aumentando os investimentos na sua geração.

Segundo Fadigas (2011), nos últimos 12 anos o vento tem sido a fonte primária de energia elétrica de maior ritmo de expansão no mundo, apresentando incremento exponencial da potência instalada. No Brasil, de acordo com Aneel (2017, p.4), as energias renováveis representam cerca de 81% da matriz elétrica existente, sendo que a energia eólica representa cerca de 10% do total de energias renováveis ou de 8,0% da matriz energética total (Figura 2).

Figura 2 - Distribuição da matriz elétrica brasileira.



Fonte: ANEEL (2017, p.4).

Segundo Aneel (2002), a avaliação do potencial eólico de uma região é dada através de uma coleta de dados sistemática sobre a velocidade e o regime de ventos. Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a 500 W/m^2 a uma altura de 50 metros. Isto significa dizer que a velocidade do vento deve ser de, no mínimo, de 7 a 8 m/s. De acordo com a Organização Mundial de Meteorologia, em apenas 13% da superfície terrestre, o vento apresenta uma velocidade média igual ou superior a 7 m/s a uma altura de 50 m (ANEEL, 2002).

De acordo com Pinto, Martins e Pereira (2017) e Gonçalves Júnior *et al.* (2021), a viabilidade de um projeto de energia eólica está diretamente associada à energia disponível que pode ser extraída do vento e de como esse recurso varia no local de instalação. Esta energia contida nos ventos, relacionada à velocidade do mesmo e ocasionada pela movimentação das massas de ar, é definida como energia cinética e pode ser calculada com o uso da Equação 1.

Suponha-se que uma determinada massa de ar m , deslocando-se com uma velocidade média igual V , o valor da energia cinética E é dado por:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (1)$$

Onde:

E = energia cinética [J];

m = massa de ar [Kg];

V = velocidade do ar [m/s].

A potência do vento, ou potência cinética, pode ser calculada através da relação entre a energia cinética (E) com a variação do tempo (Δt), como apresentada na Equação 2.

$$P = \frac{E}{\Delta t} \quad (2)$$

Onde:

P = potência cinética [W];

E = energia cinética [J];

Δt = variação do tempo [s].

Substituindo-se o valor da energia cinética da Equação 1 na Equação 2, tem-se:

$$P = \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2}{\Delta t} \quad (3)$$

Sabe-se ainda que a relação entre massa (m) e variação do tempo (Δt), define-se a vazão mássica (\dot{m}). Desta forma tem-se:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot V^2 \quad (4)$$

Ainda, a vazão mássica (\dot{m}) é determinada pela multiplicação da massa específica do fluido (ρ) pela vazão volumétrica (Q). Assim sendo, tem-se:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q \cdot V^2 \quad (5)$$

Por sua vez a vazão volumétrica (Q) é calculada pela multiplicação entre a velocidade (V) e a área do rotor/turbina da máquina eólica (A), portanto:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (6)$$

Onde:

P = potência cinética [W];

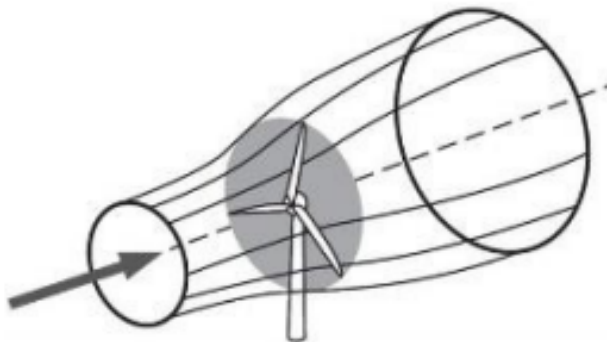
ρ = massa específica do ar [kg/m^3];

V = velocidade [m/s];

A = área do rotor/turbina da máquina eólica [m^2].

Através da Equação 6 é possível determinar a energia do ar teórica, expressada em potência cinética, a uma certa velocidade, numa dada pressão e temperatura e atravessando a superfície varrida do rotor (Figura 3).

Figura 3. Área varrida pelas pás de uma turbina de eixo horizontal



Fonte: BURTON *et al.* (2001).

A Equação 6 mostra claramente que a potência do vento varia em função do cubo da velocidade e do quadrado do comprimento das pás do rotor, que definem a área varrida. Considerando as perdas mecânicas e elétricas contidas no processo de geração de potência do aerogerador, chega-se à Equação 7 (BURTON *et al.*, 2001).

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p$$

(7)

Onde:

P = potência [W];

ρ = massa específica do ar [kg/m^3];

A = área do rotor/turbina da máquina eólica [m^2];

V = velocidade do vento [m/s];

C_p = coeficiente de potência.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para este projeto, será utilizada a bancada didática híbrida de energias renováveis eólica e fotovoltaica, modelo ENR100 da fabricante Auttom (Figura 4) existente no Instituto Federal de São Paulo (IFSP), campus de Sertãozinho.

Figura 4 - Bancada didática híbrida de energias renováveis eólica e fotovoltaica.



Fonte: Próprio autor.

Dentre os diversos experimentos atendidos, destaca-se o estudo da geração de energia elétrica a partir de placas fotovoltaicas, aerogerador e sistema híbrido com ambas as tecnologias, bem como o estudo de conceitos como a conservação de energia, eficiência e perdas no sistema.

Para a investigação da influência das características dos ventos na geração/produção de energia elétrica, os ensaios foram realizados internamente no IFSP Sertãozinho, com o auxílio de um motor e de um inversor de frequência, já existentes na própria bancada didática (Figura 5).

Figura 5 - Detalhe do motor com inversor de frequência existente na bancada.



Fonte: Próprio autor.

A variação da rotação do motor, com o auxílio do inversor de frequência, simula a variação da velocidade do vento. Quanto maior a rotação empregada ao motor, maior a velocidade de giro das pás da turbina como consequência da maior velocidade do vento.

Para aferição da velocidade de rotação do eixo de saída do motor, utilizou-se um tacômetro como mostrado na Figura 6. A rotação foi variada por meio de um *dimmer* instalado na própria bancada didática de energia eólica.

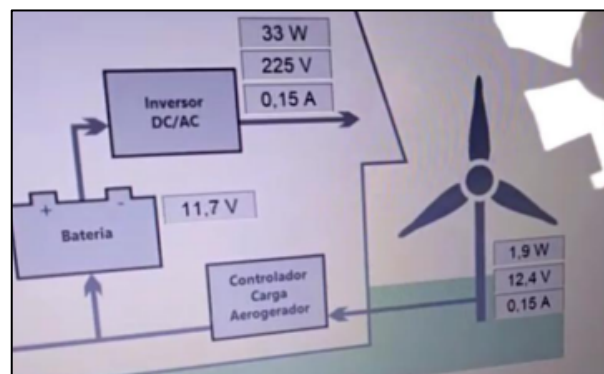
Figura 6. Medição da velocidade de rotação do motor.



Fonte: Próprio autor.

Os valores de potência extraída da turbina, para cada uma das 9 rotações empregadas ao motor (de 350 a 410 rpm, variando de 10 em 10 rpm, e depois em 450 e 500 rpm), foram obtidos em um *software* específico de energia eólica da bancada didática como mostra a Figura 7. Após cada rotação empregada, registrava-se a potência obtida, até que todas as rotações fossem avaliadas.

Figura 7. Imagem da tela do *software* que faz a leitura da potência extraída da turbina.



Fonte: Próprio autor.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra as rotações impostas pelo motor, bem como os valores de potência extraída pela turbina para cada rotação, obtidos no *software* da bancada

Tabela 1 - Relação da rotação do motor com a potência extraída da turbina.

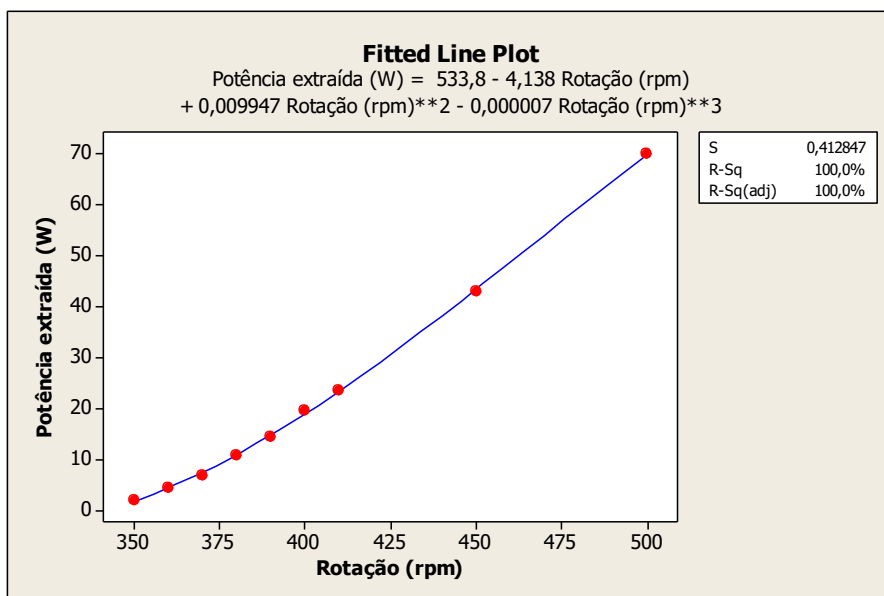
Rotação (rpm)	Potência extraída da turbina (W)
350	1,9
360	4,4
370	6,9
380	10,6
390	14,4
400	19,5
410	23,4
450	43,1
500	70,0

Fonte: Próprio autor.

Como os valores de massa específica do fluido (ρ), área de varredura das pás da turbina (A) e coeficiente de potência (C_p) não mudam independentemente da velocidade utilizada, podem ser considerados valores constantes da Equação 7. Dessa forma, a potência extraída da turbina depende exclusivamente da velocidade do vento elevado ao cubo (de acordo com a equação 7).

Para melhor visualização, plotou-se uma curva de rotação versus potência extraída da turbina, como mostra a Figura 8. Os pontos vermelhos representam cada ponto testado, e a linha azul a curva ajustada. Nota-se que a curva ajustada (função cúbica), cuja equação está apresentada na parte superior da figura, representa 100% dos pontos vermelhos coletados.

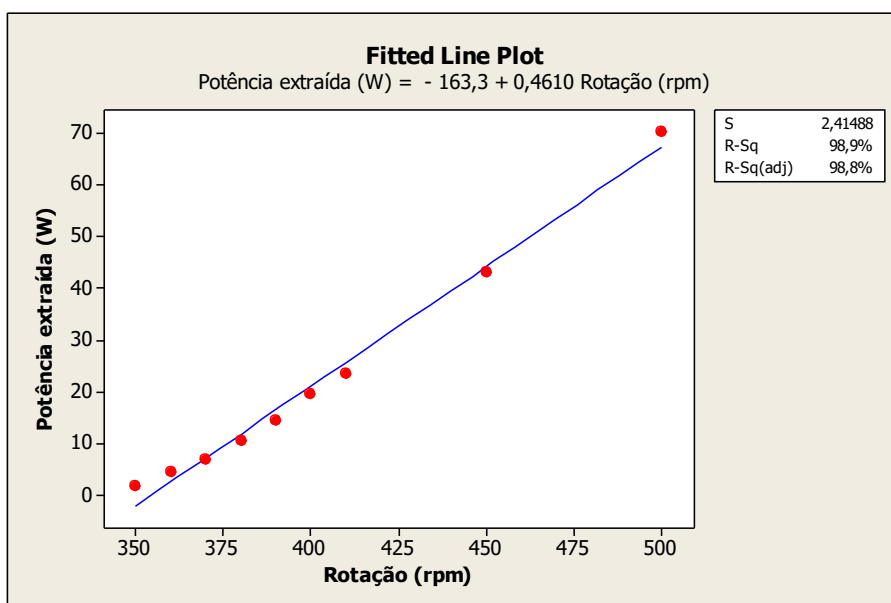
Figura 8 – Relação entre rotação e potência extraída da turbina para um ajuste de função cúbica.



Fonte: Próprio autor.

Visualmente, nota-se que a curva apresentada na Figura 8 apresenta quase que um comportamento linear e não cúbica como colocado pela Equação 7. O gráfico mostrado na Figura 9 ajusta agora os pontos vermelhos para uma curva de função linear, onde é possível perceber que a linha azul, que representa a curva ajustada agora para uma função linear, representa cerca de 98,8% dos pontos.

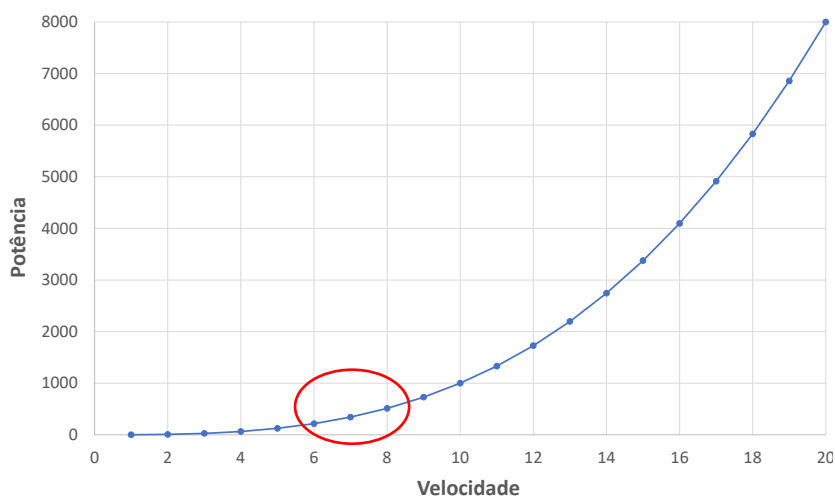
Figura 9 – Relação entre rotação e potência extraída da turbina para um ajuste de função linear.



Fonte: Próprio autor.

A primeira hipótese ao verificar o gráfico da Figura 9 é estabelecer que a potência extraída da turbina não depende da velocidade do vento ao cubo como mostra a Equação 7, por apresentar um comportamento quase que linear. Contudo, pode-se inferir que a faixa de velocidade testada pode ter sido muito pequena, o que representa, na verdade, de apenas um trecho de uma curva de relação cúbica mais ampla, como mostra esquematicamente a Figura 10.

Figura 10 – Gráfico esquemático de uma curva com função cúbica.



Fonte: Próprio autor.

O círculo vermelho, mostrado no gráfico da Figura 10, identifica uma região do gráfico onde consta uma pequena faixa de velocidade. Neste pequeno trecho pode-se deduzir que existe um comportamento quase que linear entre velocidade e potência, e não cúbica como identifica a Equação 7. Como a bancada didática apresenta uma limitação de valor máximo de rotação, fica impossível avaliar maiores faixas de rotação, não permitindo, portanto, a visualização de uma relação cúbica entre rotação do motor (que seria a velocidade do vento) e a potência extraída da turbina.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou na prática, por meio da utilização de testes em uma bancada de ensaios de energia eólica, a possibilidade da existência de uma relação

cúbica entre a velocidade do vento e a potência extraída do aerogerador como forma de validar as equações teóricas que relacionam estas duas variáveis na geração e na obtenção de energia elétrica a partir da energia eólica.

Diante dos resultados encontrados, conclui-se que a velocidade do vento interfere consideravelmente na magnitude da potência da turbina eólica, onde para maiores velocidades maiores potências extraídas. Devido à pequena faixa de velocidades testadas na bancada didática, por conta de uma limitação da própria bancada de teste, a relação entre a velocidade e a potência, que teoricamente deveria ter uma relação cúbica, pode ser representada, neste pequeno intervalo de faixa de velocidade, por uma função linear.

5. REFERÊNCIAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. – Brasília: ANEEL, 2002.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Desafios para a expansão de Geração Eólica. Associação Brasileira de Energia Eólica. 2017. Disponível em <https://www.aneel.gov.br/documents/10184/15266087/painel+3+ap+6+ABEE%C3%B3lica+-+Semin%C3%A1rio+Desafios+Expans%C3%A3o+-+ANEEL.pdf/5bfdc815-a98d-2731-3c35-dd3838bbb453>. Acesso em: 22/12/2021.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Panorama geral do setor elétrico e governança setorial. Grupo de Estudos do Setor Elétrico GESEL. Rio de Janeiro: 2019. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/documents/655804/14752877/Panorama+geral+do+setor+el%C3%A9trico+e+governan%C3%A7a+setorial_Victor.pdf/43046afc-c5ce-8f77-0f68-597e1dcfdfa0. Acesso em: 22/12/2021.

BURTON, Tony, et al. **Wind Energy Handbook**. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

CUNHA, Eduardo Argou Aires, et al. Aspectos históricos da energia eólica no Brasil e no mundo. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, 2019, v.8 (4).

FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral. **Energia Eólica**. Barueri: Manole, 2011.

GONÇALVES JÚNIOR, Elias Rocha, et al. Análise do potencial de geração de energia eólica em Campos dos Goytacazes, RJ. **Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, 2021, v. 14: 1-12.

PINHEIRO, Vinicius Marcos, et al. Análise do setor de energia eólica no Brasil. **Revista Científica UMC**, 2021, v.6 (1).



PINTO, Lucía Iracema Chipponelli; MARTINS, Fernando Ramos; PEREIRA, Enio Bueno. O mercado brasileiro da energia eólica, impactos sociais e ambientais. **Revista Ambiente & Água**, 2017, 12: 1082-1100.

PINTO, Milton de Oliveira. **Fundamentos de energia eólica**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

TRATCZ, Cleyton, et al. Energia Eólica: Alternativa renovável e sustentável para produção de energia elétrica em grande escala. In: **XIII Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial**. 2019.