

# CÁLCULO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL EM TÚNEL DE VENTO COM AEROGERADOR

Geovane Costa Clemente (Universidade Federal do Oeste da Bahia) E-mail: [geovane\\_gcc9@hotmail.com](mailto:geovane_gcc9@hotmail.com)

Luiz Justino da Silva Junior (Universidade Federal do Oeste da Bahia) E-mail: [luizjustinosj@gmail.com](mailto:luizjustinosj@gmail.com)

**Resumo:** O estudo relacionado à geração de energia elétrica por meio de turbinas eólicas e a instalação de parques eólicos têm se tornado cada vez mais crescente, conforme aumenta-se a necessidade de produção de energia limpa e renovável, sendo de total importância que seja realizada a análise na eficiência energética das turbinas eólicas, para que possa ser determinado a viabilidade de instalação das turbinas. Neste artigo, busca-se determinar a eficiência energética de turbina eólica de eixo horizontal por meio de um gerador de vento, analisando a geometria das pás, seu posicionamento, e entre outros. Para isso, foram realizadas quinze medições de tensão e corrente geradas por diferentes velocidades do escoamento do vento, com a leitura das velocidades de entrada e saída das pás eólicas, para posteriormente ser feita uma análise teórica à fim de determinar a potência elétrica aproveitada na turbina nas condições apresentadas.

**Palavras-chave:** turbina eólica, energia, eficiência, potência.

## ENERGY EFFICIENCY CALCULATION OF HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE IN TUNNEL WITH AEROGENERATOR

**Abstract:** The study related to the generation of electricity through wind turbines and the installation of wind farms has become increasingly important as the need for clean and renewable energy production grows. This article looks to determine the energy efficiency of a horizontal axis wind turbine by means of a wind generator, analyzing the blade geometry, its positioning, and among other factors. For this purpose, fifteen measurements of voltage and current generated by different wind flow speeds were performed, reading the input and output speeds of the wind turbine blades, to later be made a theoretical analysis in order to determine the electric power used by the turbine under the conditions presented.

**Keywords:** wind turbine, energy, efficiency, power.

### 1. Introdução

A energia eólica é uma das fontes de energia limpa e renovável mais exploradas nos últimos anos em território nacional, devido a grande vantagem de se produzir energia apenas com a força dos ventos (massas de ar em deslocamento). O processo de conversão de energia nas turbinas eólicas ocorre quando o vento em escoamento entra em contato com as pás eólicas, nas quais atuam forças de arrasto e sustentação atuam, ocasionando em rotação no eixo da turbina. Essa rotação faz com que o gerador seja acionado, e em seguida, a energia cinética dos ventos passa a ser convertida em energia elétrica, para finalmente ser armazenada e consumida.

Segundo dados da ABEEólica (2015/2020), a geração de energia eólica no Brasil cresceu 151,6% nos últimos 5 anos (período entre os anos de 2015 a 2020), onde a capacidade de produção anual, que inicialmente era de 6,2 GW (gigawatts) passou a ser 15,6 GW ao fim do período, representando cerca de 9,0% da matriz energética nacional em março/2020. A expectativa para os próximos 3 anos é que se alcance uma capacidade eólica de 22,5 GW em 2023, com um crescimento de 44,2% da produção atual. No total, são 7621 aerogeradores operando em 624 parques instalados no Brasil, distribuídos em 12 estados no território nacional. A Figura 1 (ABEEólica, 2020) ilustra dados recentes, fornecidos pela ANEEL, com relação a matriz energética brasileira no ano de 2020, com destaque à energia eólica em verde.

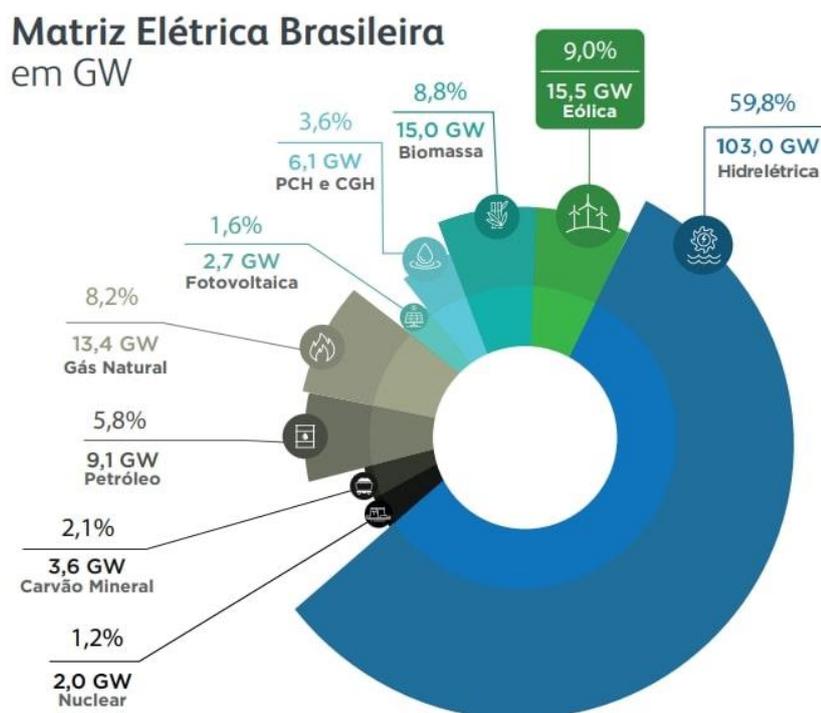


Figura 1 – Gráfico representativo da matriz energética brasileira em 2020 (ANEEL/ABEEólica, 2020).

A região de maior destaque na produção de energia eólica no Brasil é o Nordeste, com uma capacidade de geração de 13,5 GW, representando mais de 80% das torres eólicas no país (ABEEólica, 2020), conseqüentemente havendo grande impacto no PIB dos municípios da região. De acordo com a ABEEólica, no estado da Bahia – o 2º estado com maior participação no Nordeste (representando 26% de todo o país) – havia 165 parques eólicos em operação até março/2020, com mais de R\$ 15 bi já investidos, além do investimento de outros parques em processo de construção no território baiano. Devido aos altos valores investidos para o funcionamento dos parques eólicos, a grande demanda de produção de energia, assim como a crescente exploração da energia proveniente das forças dos ventos, é justificável a realização de estudos focados na eficiência das turbinas eólicas para verificar a viabilidade de suas instalações, comparando também com outras fontes de energia limpa e renovável, à fim de analisar se de fato compensa o investimento e instalação dos parques eólicos.

No Brasil, há uma predominância no uso de turbinas eólicas de eixo horizontal quando comparadas às turbinas de eixo vertical. As turbinas de eixo horizontal possuem maior eficiência e melhor relação custo-benefício, sendo aplicadas em zonas rurais por haver uma melhor passagem e um escoamento mais uniforme do vento. Essa preferência ocorre visando obter o máximo possível de um escoamento laminar do fluido, para que haja rotação ordenada e constante da turbina, gerando uma conversão mais eficiente de energia (Eólica Fácil). Para que se possa obter uma análise detalhada sobre o quão eficiente podem ser as turbinas eólicas de eixo horizontal, este estudo tem como objetivo encontrar a eficiência energética obtida no aerogerador, realizando uma relação entre a potência mecânica fornecida pelo vento, e a potência elétrica que é convertida na turbina.

## 2. Fundamentação Teórica

A necessidade de se obter um escoamento de ar uniforme para promover melhor conversão de energia na turbina eólica obriga a utilização de laminadores na seção em que o fluido esco. Um tipo de laminador que pode ser facilmente adaptado é a “colmeia” (Figura 2), e são utilizadas em túneis para que haja a redução da turbulência no escoamento do fluido

(SCHEIMAN, 1981, p. 1). “Colméias são dutos colocados ao longo do eixo da corrente de ar [...], onde todas as células são justapostas lado a lado com certo comprimento que permitem aos filamentos de ar individuais tornarem-se paralelos” (QUINTAS, 2016, p. 51).

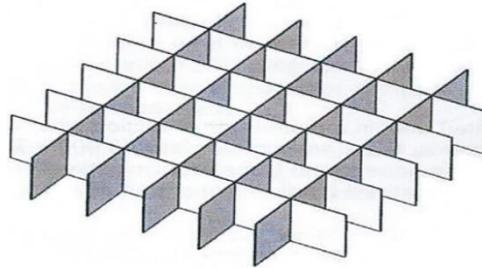


Figura 2 – Representação da colmeia utilizada no túnel do aerogerador (DE LORENZO).

A equação que representa a energia cinética  $E$  do vento para uma dada massa de ar  $m$  se deslocando com uma velocidade  $v$  é descrita por (CRESESB, 2008, p. 22):

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \tag{1}$$

Como a potência é definida como taxa de energia pelo tempo, e considerando propriedades constantes, obtêm-se, a partir da equação (1), a potência teórica disponível pelo vento:

$$P = \frac{1}{2} \frac{\Delta m}{\Delta t} v^2 \tag{2}$$

Na Figura 3 abaixo verifica-se as propriedades do escoamento em representação da parte interna do túnel:

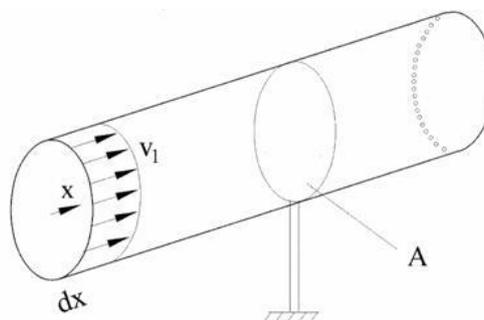


Figura 3 – “Fluxo de ar através de uma área transversal  $A$ ” (CRESESB, 2008, p. 22).

Observa-se na eq. (2) que há um termo referente à velocidade do fluido, porém, existem três velocidades que são levadas em conta para a análise do escoamento de ar no túnel (Figura 4). Essas três velocidades são a velocidade de entrada  $v_1$  (antes do ar atravessar as pás eólicas), a velocidade “aproveitada” pela turbina  $v_2$  (no instante que atinge as pás eólicas) e a velocidade de saída  $v_3$  (após o ar atravessar as pás eólicas).

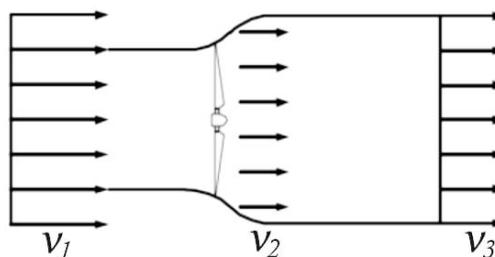


Figura 4 – Representação das velocidades do vento e suas perdas (Marques, 2008).

Como será analisada a potência apenas na seção de velocidade  $v_2$ , irá ser avaliada a potência líquida naquela seção, sendo a diferença entre a potência de entrada (total disponível pelo vento) e a potência de saída (as perdas após as pás eólicas). A partir da eq. (2), obtêm-se:

$$P_t = \frac{1}{2} \frac{\Delta m}{\Delta t} (v_1^2 - v_3^2) \quad (3)$$

Pela equação da continuidade (conservação de massa), têm-se que a taxa de variação da massa em relação ao tempo para uma determinada massa específica  $\rho$ , com escoamento em uma velocidade  $v$  e seção transversal de área  $A$  é dada por:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho v A \quad (4)$$

Avaliando a equação da continuidade na seção 2, e substituindo na eq. (3), encontra-se a potência extraída na turbina:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A v_2 (v_1^2 - v_3^2) \quad (5)$$

De acordo com o teorema de Rankine (1865) e Froude (1885), a velocidade  $v_2$  é calculada através da média aritmética entre as velocidades de entrada e saída da turbina, sendo  $v_1$  e  $v_3$  respectivamente.

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (6)$$

Substituindo a eq. (6) na eq. (5), pode ser obtida a equação final para a potência teórica extraída pela turbina, dada por:

$$P_t = \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_3) (v_1^2 - v_3^2) \quad (7)$$

A curva que relaciona a potência gerada na turbina eólica em função da velocidade do vento possui comportamento conhecido, chamada de curva de potência (Figura 5). Os parâmetros conhecidos que compõem a curva são: a velocidade mínima  $v_p$ ; a velocidade nominal  $v_n$ ; e a velocidade de corte  $v_c$ .

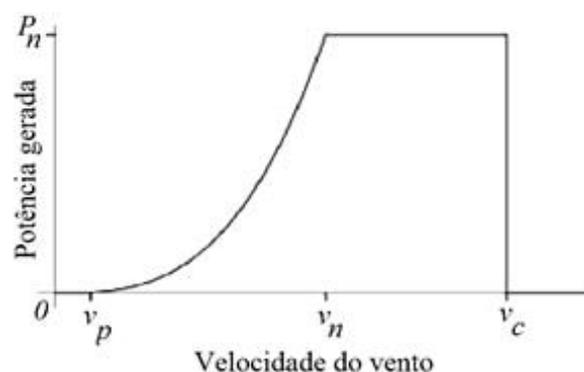


Figura 5 – Representação das velocidades do vento e suas perdas (Marques, 2008).

A velocidade mínima é aquela na qual a turbina começa a gerar potência, sendo importante ressaltar isto não ocorre no instante em que a velocidade deixa de ser nula. Velocidade nominal representa a velocidade em que a turbina gera a máxima potência, enquanto a velocidade de corte é o limite de velocidade proposto para que haja segurança e não comprometa os equipamentos (QUINTAS, 2016, p. 38-39).

A potência extraída representa a potência real convertida pela turbina, sendo o produto entre a corrente  $i$  e a tensão  $V$  geradas, obtidas através da leitura do painel eletrônico do aerogerador, conforme a Eq. (8).

$$P_{ext} = iV \quad (8)$$

O cálculo referente à eficiência energética  $\eta$  de conversão da turbina eólica é a razão entre a potência extraída e a potência teórica na turbina, dada por:

$$\eta = \frac{P_{ext}}{P_t} \quad (9)$$

A eficiência energética funciona como um parâmetro para que se possa analisar o quanto da potência fornecida pelo vento está sendo convertida pela turbina eólica.

### 3. Metodologia

A coleta dos dados para realização do cálculo da eficiência da turbina eólica consistiu em quinze diferentes medições, nas quais foram coletadas em cada uma delas as seguintes informações: frequência de rotação do gerador de vento; velocidade inicial do vento (no instante antes de atingir as pás eólicas); velocidade final do vento (após atingir as pás eólicas); tensão e corrente geradas pela turbina. O equipamento utilizado para a realização do experimento foi um aerogerador com túnel de vento DL WIND-B DE LORENZO, conforme mostra a Figura 6 abaixo:



Figura 6 – Aerogerador DL WIND-B (DE LORENZO).

Internamente, o túnel do aerogerador é composto por um ventilador industrial para a geração do vento, cuja velocidade é regulável, uma colmeia (Figura 2), um anemômetro WS1-V GEOVES, e uma turbina eólica composta por seis pás.

O anemômetro WS1-V GEOVES (Figura 7), com a função de captar a velocidade inicial do vento, é localizado entre a colmeia (que vem logo após o ventilador), e a turbina eólica. Por suceder a colmeia, a medição ocorre já em escoamento laminar.



Figura 7 – Anemômetro WS1-V (GEOVES).

A turbina eólica, conforme Figura 8, quando está em rotação, as seis pás compreendem uma área circular com diâmetro  $D = 0,58 \text{ m}$ . Para a seção circular com o diâmetro conhecido, pode-se calcular a área, obtendo um valor de área  $A = 0,26421 \text{ m}^2$ . É através da turbina que gera-se a conversão da energia cinética dos ventos em tensão e corrente no aerogerador.



Figura 8 – Turbina eólica de eixo horizontal, composta por seis pás (DE LORENZO).

Externamente ao túnel do aerogerador, estavam a fonte de alimentação com painel eletrônico para leitura dos dados, e um anemômetro TAN 050 Incoterm. A fonte de alimentação com painel eletrônico compõe o sistema do aerogerador utilizado, e é onde o ventilador industrial, o anemômetro WS1-V GEOVES e a turbina eólica são conectados, gerando a leitura dos dados no equipamento. A Figura 9 ilustra o painel.

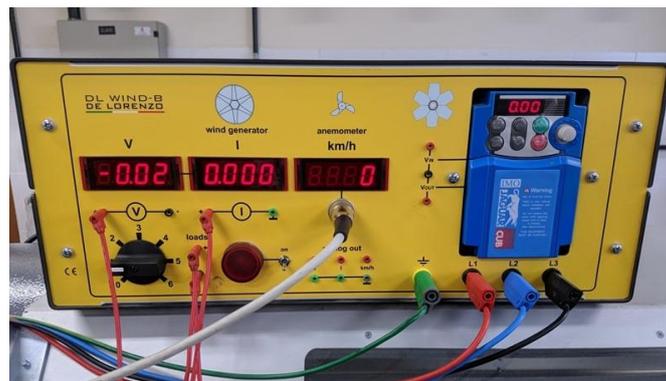


Figura 9 – Fonte de alimentação com painel eletrônico para leitura dos valores obtidos (Autores).

O anemômetro TAN 050 Incoterm (Figura 10) é utilizado manualmente, e foi posicionado manualmente logo após o túnel de vento do aerogerador, para que pudesse ser realizada a captação da velocidade final do vento, quando já houvera atingido as pás eólicas.



Figura 10 – Anemômetro TAN 050 (Incoterm).

Com a configuração do experimento preparada, pôde ser realizada as quinze medições necessárias para prosseguimento dos cálculos e análise dos resultados obtidos. O método adotado para as medições consistiu na medição inicial da frequência de rotação do gerador de vento a partir do valor de 15 Hz, havendo acréscimos de 2,5 Hz a cada leitura realizada, até que fosse atingida a velocidade de 50 Hz, na qual é o limite do gerador de vento, totalizando quinze medições, onde foi coletado todas as informações citadas anteriormente.

#### 4. Resultados e Discussão

Após a obtenção das quinze medições referentes às velocidades de entrada e saída do vento, tensão e corrente geradas, a partir de valores pré-determinados da frequência do ventilador, foi possível realizar um estudo detalhado da eficiência energética da turbina eólica utilizada. Os valores encontrados podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores coletados no experimento para a realização dos cálculos.

Frequência (Hz)	Tensão (V)	Corrente (A)	Vel. de entrada (m/s)	Vel. de saída (m/s)
15,0	6,16	0,063	3,06	1,50
17,5	7,88	0,081	3,61	1,81
20,0	9,70	0,101	4,17	2,00
22,5	11,48	0,119	4,72	2,28
25,0	13,11	0,137	5,28	2,53
27,5	13,62	0,142	6,11	2,86
30,0	13,63	0,142	6,39	3,06
32,5	13,27	0,139	6,94	3,31
35,0	13,07	0,136	7,50	3,56
37,5	12,73	0,134	8,06	3,83
40,0	12,69	0,132	8,33	4,08
42,5	12,62	0,130	9,17	4,39
45,0	12,55	0,128	9,72	4,92
47,5	12,40	0,125	10,00	5,42
50,0	12,27	0,126	10,83	5,83

Fonte: Autores

A partir das equações (7) e (8), pôde ser calculada a potência teórica disponível pelo vento e a potência elétrica extraída pela turbina eólica, respectivamente, onde  $v_1$  é a velocidade de entrada,  $v_3$  é a velocidade de saída, com seção do túnel de área constante  $A = 0,26421 m^2$  e massa específica do ar  $\rho = 1,2 kg/m^3$ . Os valores calculados, referentes a cada velocidade de entrada do vento, foram colocados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Valores das potências disponível e extraída para cada velocidade de entrada do vento.

Vel. de entrada (m/s)	Potência disponível (W)	Potência extraída (W)
3,06	2,5711	0,3881
3,61	4,1912	0,6383
4,17	6,5479	0,9797
4,72	9,4767	1,3661
5,28	13,2955	1,7961
6,11	20,7271	1,9340
6,39	23,5710	1,9355
6,94	30,2291	1,8445
7,50	38,2012	1,7775

8,06	47,3996	1,7058
8,33	51,8804	1,6751
9,17	69,6655	1,6406
9,72	81,5444	1,6064
10,00	86,3187	1,5500
10,83	109,9994	1,5460

Fonte: Autores

Graficamente, verifica-se o comportamento das potências em relação à velocidade de escoamento do ar, podendo ser realizada uma comparação entre as potências disponível e extraída.

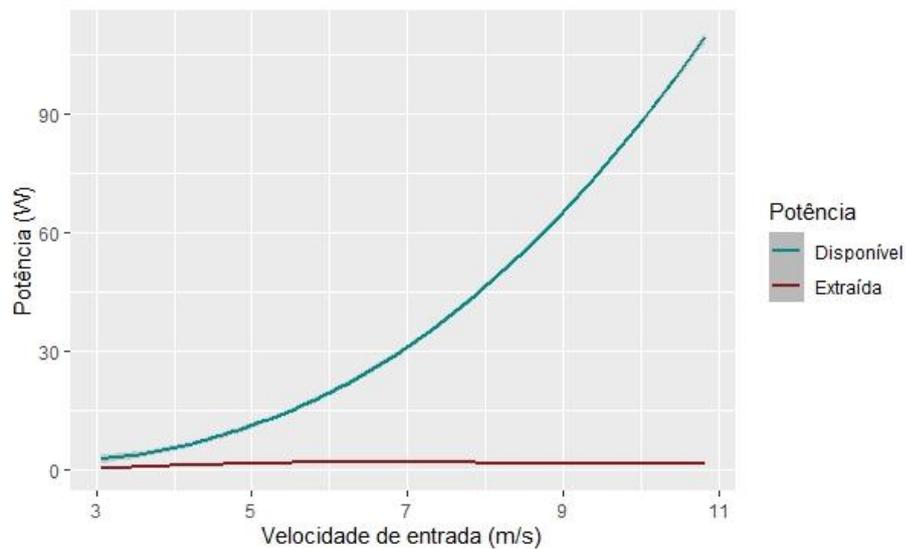


Figura 11 – Comparativo das potências disponível e extraída na turbina em relação à velocidade de entrada.

Nota-se que conforme a velocidade de entrada  $v_1$  aumenta, ocorre um maior distanciamento entre a curva da potência disponível e a curva da potência extraída. Isso significa que a eficiência da turbina, ao atingir valor máximo, tende a diminuir conforme as massas de ar se deslocam com maior velocidade. Podemos analisar a curva da eficiência da turbina eólica de acordo com a variação da velocidade na imagem a seguir.

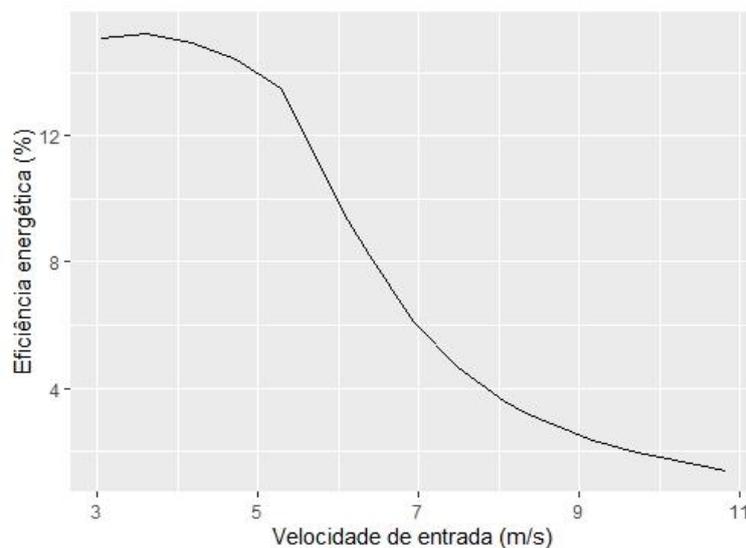


Figura 12 – Eficiência energética da turbina eólica em função da velocidade de entrada.

Verifica-se, portanto, que após atingir a velocidade de 5 m/s, aproximadamente, há uma queda brusca na eficiência energética da turbina eólica. Torna-se visível que ao ter como objetivo aproveitar ao máximo toda a energia cinética fornecida pelos ventos, é recomendável que seja realizado com uma velocidade não superior a 5 m/s. Isto vale para o túnel e o aerogerador sendo avaliado neste experimento, de acordo com as condições apresentadas. A notável variação da eficiência tem como influência diversos fatores, como por exemplo o escoamento do ar que deixa de ser em regime laminar e passa a ser turbulento por conta do aumento da velocidade, ou vibrações ocasionadas internamente na turbina devido ao grande fluxo de ar atingindo-a, e entre outros.

Pode-se obter, analisando através de uma escala maior, um gráfico derivado do que foi apresentado na Figura 11, desta vez dando mais foco apenas à potência extraída pela turbina, a fim de se verificar com mais detalhes o seu comportamento durante o aumento da velocidade do vento. O gráfico abaixo representa a “curva de potência”, ou seja, seu comportamento é similar ao apresentado na Figura 5.

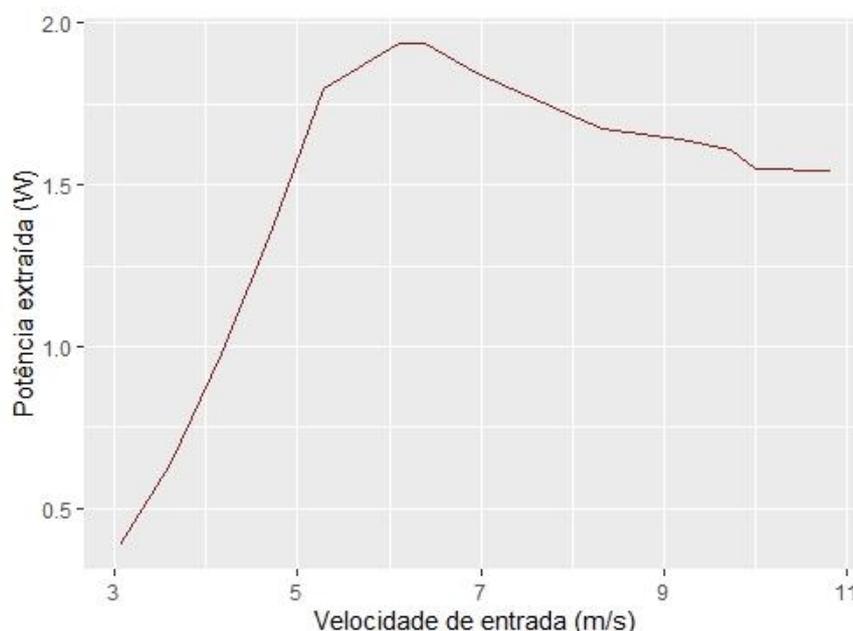
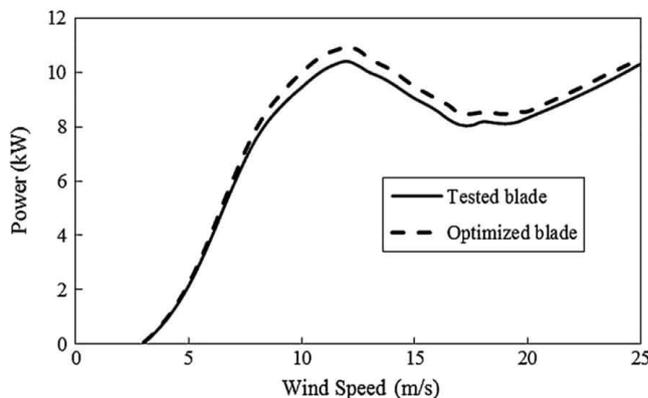


Figura 12 – Eficiência energética da turbina eólica em função da velocidade de entrada.

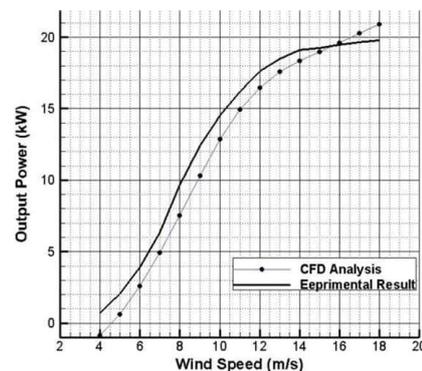
Analisando a figura acima, percebe-se uma maior extração de potência em torno da velocidade de entrada de 6 m/s. Ao contrário do que mostra na Figura 11, a região que vem logo após a velocidade de 5 m/s ainda apresenta resultados positivos em comparação à eficiência energética. A eficiência, por sua vez, é um parâmetro que verifica o quanto da potência que o vento fornece está sendo transformada na turbina eólica. Mas como na prática não há custo em relação ao escoamento do vento, é mais útil analisar a turbina eólica com foco na potência extraída em relação a sua velocidade de entrada, isto porque o deslocamento de ar ocorre naturalmente, e as perdas obtidas durante a transformação de energia acabam não possuindo relevância por esse lado, apesar de servir como base para obtermos valores próximos dos ideais. Fica proposto então, que a turbina eólica trabalhada no experimento possui maior extração de potência na região com velocidade entre 5 e 7 m/s.

Em termos de comparação, pode-se analisar resultados obtidos através de testes executados em outras pesquisas, realizadas por terceiros. A Figura 13 mostra dois gráficos representativos da curva de potência, cujo comportamento da curva pode ser associado com o que foi obtido na Figura 12. Os gráficos da Figura 13 fazem parte de pesquisas distintas relacionadas à

aerodinâmica das pás eólicas, nas quais a obtenção de dados é focada na simulação computacional, mas que possam ser úteis na compreensão dos resultados de práticas experimentais.



(b) Curva de potência (HASSANZADEH et al, 2016)



(a) Curva de potência (SALARI et al, 2018)

Figura 13 – Curvas de potência obtidas experimentalmente ou através de simulação.

Na figura 13-a está representado um comparativo da curva de potência para duas condições: pás eólicas em uma determinada condição inicial (curva contínua), e pás eólicas otimizadas (curva tracejada), cujos resultados foram obtidos através de simulação computacional. Enquanto isso, a figura 13-b ilustra uma curva de potência obtida por meio de simulação (curva marcada por pontos) e uma curva obtida experimentalmente (curva contínua). Nota-se que as quatro curvas apresentadas pelos dois gráficos se assemelham com o resultado obtido através do experimento com o túnel de vento (Figura 12), no qual há um aumento na taxa de variação da potência em relação à velocidade de entrada, mas que se estabiliza e então a potência de saída torna-se quase constante, havendo pouca variação e oscilando próximo à um determinado valor. É importante ressaltar o quão útil pode ser a simulação computacional, apresentando lógica e precisão nos resultados, conforme é possível notar na Figura 13.

Apesar dos valores de potência serem diferentes em cada um dos gráficos nas figuras 12 e 13, isso é justificado pelas condições na qual a turbina eólica estiver operando. Há vários fatores que possam influenciar nos valores a serem obtidos de potência gerada, como a temperatura que influencia a massa específica do ar, a área em que as pás eólicas operam, turbulência no escoamento, e entre outros. Porém, quando se analisa o comportamento gráfico da potência em relação à velocidade do vento, a tendência é que se obtenha comportamentos similares, já que a única variável é a velocidade, tornando as outras propriedades constantes. Desta forma, considera-se válido o resultado obtido na Figura 12, visto que já era um comportamento esperado, demonstrando semelhanças aos padrões apresentados nos gráficos tomados como referência.

## 5. Conclusão

Sabe-se que as turbinas eólicas em geral não possuem grande desempenho quando verificamos a sua eficiência na conversão de potência. A turbina eólica que foi analisada, sendo de eixo horizontal e contendo seis pás, apresentou uma eficiência máxima em torno de 15~16%, mas com uma velocidade de vento muito baixa. Isto significa que com velocidades baixas, podemos aproveitar melhor a energia cinética dos ventos, porém, a produção de energia seria em uma escala muito menor, já que ela é um fator diretamente proporcional à velocidade do vento. Ao trabalhar com velocidades de vento maiores, é possível converter mais energia em menos tempo que anteriormente, mas é preciso ter atenção, visto que velocidades muito altas podem provocar escoamento turbulento e vibrações internas na turbina, ocasionando em falhas e afetando

negativamente na conversão de energia. É preciso que haja uma região ideal para um melhor aproveitamento da energia dos ventos, sendo necessário uma análise tanto na eficiência quanto na potência extraída. Neste caso, a região que se destaca é com velocidade de entrada de aproximadamente 5~6 m/s.

Os dados encontrados nos fornecem uma melhor perspectiva sobre as turbinas eólicas, no qual foi possível abordar os números durante a variação da velocidade do vento. O sistema de turbina eólica de pequeno porte, no qual foi trabalhado neste artigo, funcionou como uma forma de obter dados que se assemelham e que possam trazer informações de forma análoga ao que seria obtido em sistemas reais, como os que são utilizados na prática. Estes dados foram tratados buscando fazer uma generalização, cujas propriedades do escoamento são as mesmas em ambos os sistemas. Desta forma, os valores obtidos podem servir como termos de comparação e análise quando se verificam os grandes sistemas das turbinas de conversão de energia eólica. Finalmente, pôde-se verificar que essa analogia é válida ao verificar as curvas de potência apresentadas nas Figuras 5 e 12, cujas curvas teórica e experimental, respectivamente, apresentaram grandes similaridades entre si.

### **Referências**

**ABEEólica.** *Energia Eólica: Os bons ventos do Brasil.* INFOVENTO 15, mar/2020.

**ABEEólica.** *Boletim de Dados.* mar/2015.

**Eólica Fácil.** *Turbinas eólicas de eixo horizontal.* Acesso em 6 de janeiro de 2020.

**SCHEIMAN, J.** *Considerations for the Installation of Honeycomb and Screens to Reduce Wind-Tunnel Turbulence.* NASA, 1981.

**QUINTAS, B. J.** *Análise Experimental e Computacional Para Extração da Máxima Potência em Aerogeradores de Pequeno Porte.* Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.

**DUTRA, R.** *Energia Eólica: Princípios e Tecnologias.* CRESESB, 2008.

**PESSANHA, J. F. M., SILVA, I. V. G., SOUZA, R. C.** *Previsão da Velocidade do Vento Com Sistema de Inferência Neuro-Fuzzy Adaptativo.* Rio de Janeiro, 2010.

**HASSANZADEH, A., HASSANABAD, A. H., DADVAND, A.** *Aerodynamic shape optimization and analysis of small wind turbine blades employing the Viterna approach for post-stall region.* Alexandria Engineering Journal, 2016.

**SALARI, M. S., BOUSHEHRI, B. Z., BOROUSHAKI, M.** *Aerodynamic Analysis of Backward Swept in HAWT Rotor Blades Using CFD.* Int. Journal of Renewable Energy Development, 2018.