



## EFICIÊNCIA DE TURBINAS EÓLICAS HORIZONTAIS

*Primeiro Autor – e-mail\**

*Instituição de Ensino, Faculdade ou Departamento\**

*Endereço \**

*CEP – Cidade – Estado\**

*Segundo Autor – e-mail\**

*Instituição de Ensino, Faculdade ou Departamento\**

*Endereço\**

*CEP – Cidade – Estado\**

**Resumo:** *Este trabalho tem o objetivo de mostrar a eficiência de uma turbina eólica horizontal através do enquadramento de cálculo analítico e algébrico, com intuito de chegar a um coeficiente de aproveitamento máximo da energia dos fluxos de ar. Com isto constatar que o equipamento tem um ponto máximo de rendimento. Ajudando assim, engenheiros e projetistas a buscarem soluções inteligente para o aumento da eficiência de equipamentos, uma vez que a energia cinética dos ventos pode ser aproveitada até certo ponto.*

**Palavras-chaves:** *Energia Eólica, Turbinas Eólicas, Rendimento.*

### 1 INTRODUÇÃO

O aquecimento desigual da atmosfera da Terra, gera fluxos de vento e com este fenômeno natural do planeta, o homem se beneficia para fazer a transformação desta energia cinética em energia elétrica, utilizando as turbinas eólicas.

Estas turbinas são projetadas a fim de retirar o máximo de energia dos fluxos de ar, porém, em toda conversão de energia geram-se perdas, e estas podem fazer com que um sistema ou equipamento não funcione em sua totalidade. No mercado existem diversos tipos de turbinas. Neste trabalho foi estudada uma delas, a turbina horizontal, o equipamento mais difundido na atualidade no que tange a energia eólica.

A busca de engenheiros e projetistas a fim de desenvolverem equipamentos mais eficientes é ininterrupta. Isso faz com que muitas considerações sejam feitas e algumas padronizações em situações hipotéticas sejam adotadas para efeitos de cálculo.



## 2 TURBINAS EÓLICAS

A Turbina Eólica, apresentada na Figura 01, é um equipamento capaz de transformar a energia cinética dos ventos, em energia elétrica. A análise das turbinas eólicas é abundante em conteúdo, envolve vários aspectos, tais como: aerodinâmica e mecânica dos fluidos.

Entretanto alguns conceitos podem ser obtidos a partir de simplificações analíticas, padronizando circunstâncias.

Figura 01 – Turbina eólica horizontal.



Autor: TOZZI GREN, 2011

## 3 ANÁLISE MATEMÁTICA DAS TURBINAS HORIZONTAIS

Para efeitos de cálculo, é possível considerar a energia do vento horizontal, sendo sua energia cinética, adotando um padrão sem variação de pressão e altura, que é dada pela Equação 1.

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

Onde:

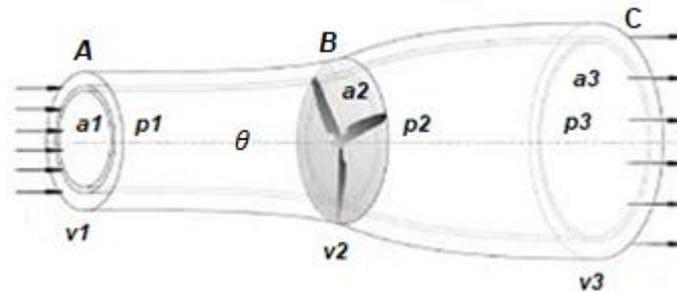
$E$  - Energia;

$m$  - Massa;

$v$  - Velocidade.

Para a Equação 1 ser aplicada, faz-se necessário conhecer a velocidade e a massa a serem consideradas. A Figura 2 apresenta uma primeira aproximação para o fluxo de ar através de um rotor de uma turbina eólica, onde:  $v$  - velocidade;  $a$  - área;  $p$  - pressão;  $A$ ,  $B$  e  $C$  - tempos de passagem do fluxo de ar.

Figura 02 - Fluxo de ar através de uma turbina eólica.



Autor: Elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 2 é possível constatar que, a energia aproveitada do vento irá provocar uma diminuição em sua energia no instante C, o que resulta em uma redução de velocidade após a turbina. Para a massa, é adotada uma aproximação que consiste na conservação de massa do duto fictício. A conservação é aplicada para todo o duto conforme a Equação 2.

$$\rho \cdot a1 \cdot v1 = \rho \cdot a2 \cdot v2 = \rho \cdot a3 \cdot v3 \quad (2)$$

Onde:

- $\rho$  - Densidade do ar;
- $a$  - Área;
- $v$  - Velocidade;
- $\theta$  - Fator de fluxo axial.

A velocidade no instante B está relacionada com a velocidade do vento. Assim, adota-se um fator de fluxo axial -  $\theta$ , na Equação 3.

$$v2 = v1 \cdot (1 - \theta) \quad (3)$$

Aplicando a Equação 3 na Equação 2, tem-se:

$$a2 = \frac{a1}{(1-\theta)} \quad (4)$$

Com isto, é possível constatar que devido a conservação de massa, a redução da velocidade do vento no instante C, levou a um aumento da área do tubo fictício. A força exercida pela variação de pressão no rotor da turbina acarreta uma redução de velocidade do vento e pode ser representada matematicamente nas Equações 5 e 6.

$$\Delta v \cdot m = \Delta p \cdot a \quad (5)$$

$$(v1 - v3) \cdot \rho \cdot a2 \cdot v1 \cdot (1 - \theta) = (p2^+ - p2^-) \cdot a2 \quad (6)$$



Aplicando a equação de Bernoulli às duas seções do tubo, tem-se:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho_1 \cdot v^2 + \rho_1 \cdot g \cdot h_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho_2 \cdot v^2 + \rho_2 \cdot g \cdot h_2 + p^+ - p^- \quad (7)$$

Analisando o fluido incompressível e o fluxo horizontal:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + p_2 \quad (8)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_3^2 + p_3 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + p_2^- \quad (9)$$

Subtraindo as Equações 8 e 9, tem-se a Equação 10:

$$(p_2^+ - p_2^-) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_1^2 - v_3^2) \quad (10)$$

A Equação 10 demonstra que a variação da velocidade do vento ocorre parte no instante A e a outra parte no instante C do aerogerador.

Substituindo a Equação 10 na Equação 6, obtém-se a Equação 11.

$$v_3 = (1 - 2 \cdot \theta) \cdot v_1 \quad (11)$$

A força e potência exercida pelo vento na turbina pode ser expressa matematicamente pelas Equações 12 e 13.

$$f = (p_2^+ - p_2^-) \cdot a_2 = 2 \cdot \rho \cdot a_2 \cdot v_1^2 \cdot \theta \cdot (1 - \theta) \quad (12)$$

$$p = f \cdot v_2 = 2 \cdot \rho \cdot a_2 \cdot v_1^3 \cdot \theta \cdot (1 - \theta)^2 \quad (13)$$

Com a dedução matemática das equações acima referenciadas, é possível observar que, a potência é proporcional ao cubo da velocidade de  $v_1$  e à área do rotor da turbina no instante B. Portanto a expressão de potência pode ser escrita conforme a Equação 14.

$$p = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \theta \cdot v_1^3 \quad (14)$$

O coeficiente de potência  $C_p$  é deduzido matematicamente, pela potência extraída pela turbina, dividida pela potência do vento no instante B.

$$C_p = \frac{p}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^3 \cdot \theta} \quad (15)$$

Para efeitos de cálculo é possível também reescrever o coeficiente 'Cp', onde combinando as Equações 14 e 15, tem-se a Equação 16.

$$C_p = 4 \cdot a^2 \cdot (1 - \theta)^2 \quad (16)$$

Com tal dedução e de acordo com o algebrismo de Albert Betz, a potência máxima possível a ser extraída do vento é calculada pelas Equações 17 e 18.

$$\frac{dC_p}{d\theta} = 4 \cdot (1 - \theta)^2 - 8 \cdot \theta \cdot (1 - \theta) = 0 \quad (17)$$

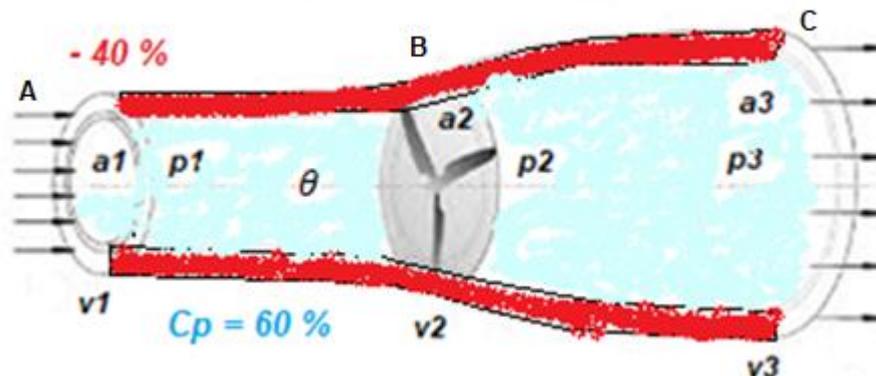
$$\theta = \frac{1}{3} \quad (18)$$

Substituindo o valor obtido na Equação 16, chega-se à Equação 19.

$$C_p = 4 \cdot \frac{1}{3} \cdot \left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 = \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^2 = \frac{16}{27} = 0,59259 \quad (19)$$

A Equação 19 mostra que de acordo com a análise matemática, o comportamento da Figura 02 é melhor exemplificado e pode ser deduzido pela Figura 03 abaixo, onde é possível concluir que o fator Cp é importante para projetos aerodinâmicos de turbinas eólicas.

Figura 03 - Fluxo de ar através de uma turbina eólica



Autor: Elaborado pelo autor.



#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A presente análise possibilita entender que por mais eficiência que um aerogerador apresente, ele só será capaz de trabalhar com aproximadamente 60% da energia cinética dos fluxos de vento.

Com o aerogerador em funcionamento, seu movimento produz um torque contrário na massa de ar. Isto significa que no instante C o ar recebe uma rotação contrária à rotação do rotor, que não existia antes. Isto ocorre pelo fato do aerogerador modificar o regime de fluxo de ventos, causando uma ligeira turbulência no ato da movimentação de suas pás, gerando o torque necessário para fazer com que o equipamento transforme energia cinética em energia elétrica. Entretanto tal turbulência gera perdas.

Vale ressaltar que o conjunto rotor e pás tem certo peso, e a medida que começam a sair da inércia, não acompanham de forma satisfatória e imediata o regime de ventos e suas velocidades, fazendo com que existam atrasos na saída da inércia e no movimento de frequência única. Dessa forma, os sistemas apresentam grandes oscilações de conversão de energia.

#### **REFERÊNCIAS**

ABEEOLICA - <http://abeeolica.org.br/> site visitado em 2020.

ACKERMANN T, SODER L. An Overview of Wind Energy-status 2002. Renewable and Sustainable Energy.

ANNEL - <https://www.aneel.gov.br/> site acessado em 2020.

ANNEL - [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia\\_eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf) / site acessado em 2020.

BOYLE, GOFREY. Renewable Energy: Power for a Sustainable Future. Oxford University.

DEWI - DEUTSCHES WINDENERGIE-INSTITUT. Windenergie 2004: Onshore-Markt entwickelt sich erwartungsgemäß - Offshore-Markt muss an Fahrt gewinnen. Site visitado [www.dewi.de](http://www.dewi.de), 2019.

DUTRA, RICARDO MARQUES, 2001, Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica Face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro, Dissertação de Mestrado, Programa de Planejamento Energético - PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.

ELIAB RICARTE. Avaliação de Sítios para o Aproveitamento dos Recursos Energéticos das Ondas do Mar, Tese de Doutorado – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

<https://ecoa.org.br/> site acessado em 2020.

ENZENSBERGER, N. "Policy Instruments Fostering Wind Energy Projects – A Multi-perspective Evaluation Approach", Energy Policy, v. 30, pp. 93-801, 2002.

EWEA - EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION. A Plan for Action in Europe - Wind Energy: The Facts, European Commission - Directorate General for Energy, London, 1997.

GWEC - Global Wind Energy Council . Annual Market Update 2017 - Global Wind 2017 Report . India, 2017.

GIPE, PAUL. Wind Energy Comes of Age, John Wiley & Sons, Inc., USA, New York, 1995.

JACKSON, TIM. "Renewable Energy - Summary Paper for the Renewables Series", Energy Policy, Series of 25 Papers, pp. 861-882, September, 1992.

SCHAFFARCZYK, ALOIS. Understanding Wind Power Technology Theory, Deployment And Optimisation. John Wiley & Sons, Ltd, United Kingdom, 2014.

WEC – WORLD ENERGY CONCIL. Renewable Energy Resources: Opportunities and Constraints 1992-2020, WEC, London, 1993.

Wind Power - Danish Wind Industry Association. Guided Tour on Wind Energy. [www.windpower.org](http://www.windpower.org).

WIND POWER - [www.windpower.org](http://www.windpower.org), Site visitado em 2020.

WWEA - World Wind Energy Association. WWEA Quarterly Bulletin - Wind Energy Around the World. Issue 1, March, 2016.

## EFFICIENCY OF HORIZONTAL WIND TURBINES

**Abstract:** *This work aims to show the efficiency of a horizontal wind turbine through the framework of analytical and algebraic calculation, in order to reach a coefficient of maximum use of the energy of the air flows. With this, verify that the equipment has a maximum performance point. Thus helping engineers and designers to seek intelligent solutions to increase equipment efficiency, since the kinetic energy of the winds can be harnessed to a certain extent.*

**Keywords:** *Wind Energy, Wind Turbines, Yield.*