

# ANÁLISE DO EFEITO ESTEIRA SOBRE A PRODUÇÃO DE ENERGIA EM PARQUES EÓLICOS

Andressa Azevedo Jamar – [andressajamar@hotmail.com](mailto:andressajamar@hotmail.com)

Gabriel Ivan Medina Tapia - [gmedinat@ct.ufrn.br](mailto:gmedinat@ct.ufrn.br)

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Mecânica

Laboratório de Sistemas Térmicos e Energias Alternativas - LSTEA

**Resumo.** *Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um algoritmo com o intuito de estudar a influência do efeito esteira na produção energética de um parque eólico. O algoritmo calcula a velocidade do vento após incidir nas hélices de um aerogerador para em seguida determinar a curva de potência. A variação da velocidade do vento, no período de um ano, foi representada pela distribuição de frequência de Weibull, uma função de densidade probabilística de dois parâmetros denominados fatores de forma e escala. A partir da multiplicação dessa função pela curva de potência estima-se a produção anual de energia para cada aerogerador. Os resultados são comparados para vários intervalos de distância entre torres eólicas, considerando uma região disponível com 2400 m de comprimento, sendo possível encontrar um espaçamento equivalente a 600 m em que ocorre um maior rendimento energético. O distanciamento entre os aerogeradores influencia na capacidade de produção de uma usina, por isso, é indispensável avaliar o tamanho da região disponível para a construção de um parque eólico, o número de aerogeradores e a velocidade do vento incidente.*

**Palavras-chave:** *Efeito esteira, Produção de energia, Energia eólica*

## 1. INTRODUÇÃO

Com a modernização da agricultura, desenvolvimento do parque industrial, aumento da capacidade do consumo da população e dos níveis de conforto, o consumo de energia só tende a aumentar. Suprir toda essa demanda energética com combustíveis fósseis torna-se inviável, pois acarretam danos ao meio ambiente. Por isso, investimentos em energias renováveis tornam-se uma alternativa mais adequada. De acordo com o Global Wind Energy Council (GWEC), no ano de 2016, o Brasil ficou na 5ª posição no ranking mundial de expansão da capacidade instalada de geração eólica, tendo um acréscimo de 2.014 Megawatts de energia. Devido à relevância dessa fonte de energia, é indispensável realizar estudos e avaliações dos fatores que podem influenciar o potencial de produção de uma usina eólica (Couto; Farias, 2013).

Os aerogeradores extraem energia cinética do vento que após passar pelas hélices diminui a sua velocidade, conseqüentemente, a produção energética do aerogerador a posterior diminui (Martínez, 2003). O fenômeno descrito é chamado de efeito esteira e é um dos maiores contribuidores para a perda da produtividade de um parque eólico. A região da esteira pode ser dividida em *near wake* (esteira próxima) como sendo a região da esteira logo atrás do rotor e, *far wake* (esteira distante) a região onde se estuda a influência da turbina eólica na sua produção de energia analisando o modelo da esteira, sua influência e efeitos da topografia (Vermeer; Sorensen, Crespo, 2003).

A verificação do melhor posicionamento dos aerogeradores pode ser realizada por uma simulação numérica usando os modelos de Jensen, Lersen ou Frandsen (Renkema, 2007) para calcular a velocidade do vento sobre o efeito esteira. O conhecimento das características do vento é de grande importância quando se deseja saber a potencialidade eólica de um local. A distribuição de Weibull propõe uma modelagem confiável para se conhecer a frequência da velocidade do vento em um determinado período de tempo (Catalão, 2012).

O objetivo desse artigo foi desenvolver um algoritmo para solucionar o problema do posicionamento entre aerogeradores de um parque eólico hipotético, a fim de se ter uma menor perda da produção energética devido ao efeito esteira. Ademais, considera-se a quantidade possível de aerogeradores instalados, pois um aumento em sua quantidade pode ocasionar um acréscimo no investimento inicial (Moskalenko; Rudion, Orth, 2010). A análise da potencialidade de produção energética se deu através dos gráficos da curva de potência, distribuição de Weibull e produção anual de energia (Pontes, 2016).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Efeito Esteira

O modelo de esteira estudado nesse artigo foi proposto por Jensen (1984), sendo utilizado em *softwares* como *WAsP*, *WindFarmer* e *WindPRO* (Renkema, 2007). Conforme mostrado na Fig. 1, esse modelo fundamenta-se no conceito de que a expansão do diâmetro da esteira ocorre de forma linear e varia em função do distanciamento à jusante.

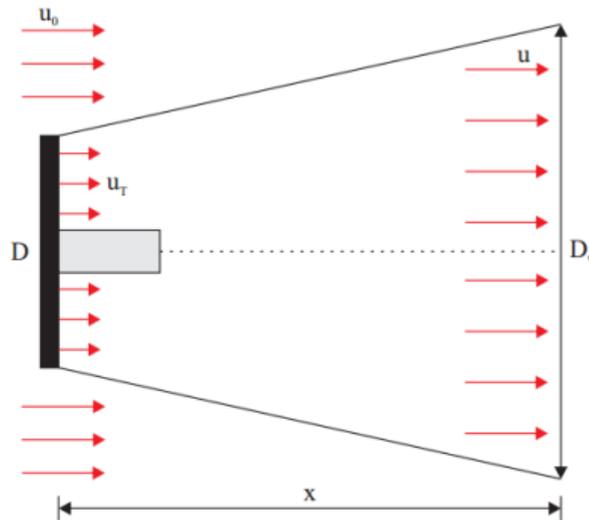


Figura 1 - Aumento do diâmetro da esteira segundo o modelo de Jensen (Choi e Shan, 2013).

O diâmetro da esteira,  $D_w$ , pode ser calculado pela Eq. (1), sendo  $D$  o diâmetro do rotor,  $k_w$  o coeficiente de decaimento da esteira e  $x$  a distância. O valor de  $k_w$  é encontrado através da Eq. (2), no qual  $h$  a altura do cubo da turbina e  $z_o$  a rugosidade média do terreno.

$$D_w = D \left( 1 + 2k_w \frac{x}{D} \right) \quad (1)$$

$$k_w = \frac{0,5}{\ln \left( \frac{h}{z_o} \right)} \quad (2)$$

A velocidade do vento em uma esteira pode ser calculada a partir da Eq. (3), sendo  $u$  a velocidade do vento na direção do eixo  $x$ ,  $u_o$  a velocidade inicial do vento antes de incidir nas hélices do aerogerador,  $c_t$  o coeficiente de empuxo que é igual a 0,889 e  $r_o$  o raio do rotor da turbina eólica (Sá, 2015).

$$u = u_o \left[ 1 - \frac{1 - \sqrt{1 - c_t}}{1 + \left( \frac{k_w x}{r_o} \right)^2} \right] \quad (3)$$

### 2.2. Cálculo da potência de um aerogerador

A relação entre a potência de saída do aerogerador com a velocidade incidente dá origem a curva de potência (Hau, 2013). A partir dos dados das velocidades médias anuais, pode-se encontrar a potência máxima

de energia gerada através da Eq. (4), tendo  $c_p$  como coeficiente de potência,  $A_r$  a área do rotor,  $\rho$  a massa específica e  $V_o$  a velocidade do vento. O gráfico da curva de potência é apresentado na Fig. 2 e destacam-se três tipos de velocidade: a velocidade de entrada ou acionamento ( $v_{cut-in}$ ), velocidade nominal ( $v_{nom}$ ) e a velocidade de corte de saída ( $v_{cut-out}$ ) a qual é o limite para o funcionamento da turbina, após esse valor seu funcionamento é interrompido para evitar danos estruturais.

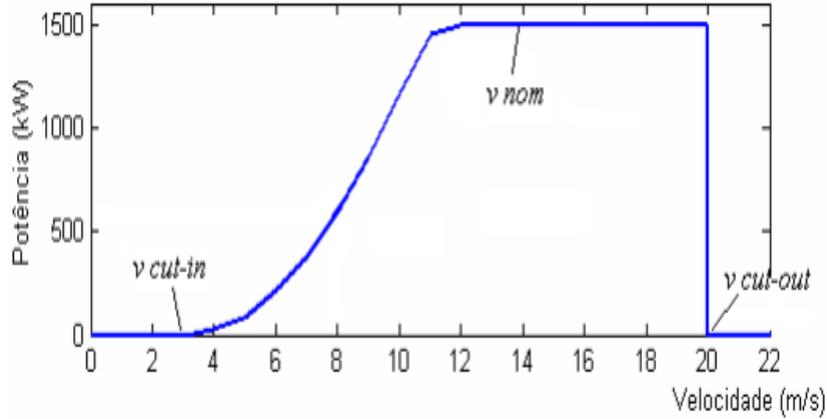


Figura 2 - Curva de potência de uma turbina eólica (Mendonça, 2009).

$$P_M = \frac{1}{2} c_p \rho A_r V_o^3 \quad (4)$$

Apesar de necessária para a viabilização de um projeto de um parque eólico, somente a construção do gráfico da curva de potência de uma usina eólica não é o suficiente para deduzir a produção anual de energia, uma vez que seria preciso o conhecimento do número de horas de funcionamento da turbina em função das diversas velocidades do vento. Para isso usa-se a distribuição de Weibull.

### 2.3. Distribuição de Weibull

Utilizada para mostrar a distribuição da velocidade ao longo de um determinado período de tempo (Catalão, 2012), a distribuição de Weibull é dada pela Eq. (5). Em que  $k$  é o fator de forma, adimensional,  $c$  o fator de escala e  $V$  a velocidade média do vento.

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (5)$$

Os parâmetros  $k$  e  $c$  podem ser encontrados de maneira empírica (Chang, 2011). O fator de forma, conforme a Eq. (6), pode ser determinado por meio do desvio padrão ( $\sigma$ ) e da velocidade média ( $\bar{v}$ ) da amostra.

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1,086} \quad (6)$$

A partir do valor de  $k$  é possível encontrar o valor do fator de escala  $c$ , que é dado pela Eq. (7). O gama é uma função do fator de forma e pode ser definida através da Tab. 1.

$$c = \frac{v}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (7)$$

Tabela 1 - Valores de gama para o fator de forma.

<b>k</b>	<b><math>\Gamma(1 + 1/k)</math></b>
1,25	0,931840
1,5	0,902745
1,6	0,896574
1,7	0,892244
1,8	0,889287
1,9	0,887363
2,0	0,886227
2,1	0,885694
2,2	0,885625
2,3	0,885915
2,4	0,886482
2,5	0,887264
3,0	0,892979
3,5	0,899747
4,0	0,906402

Fonte: (Rohatgi, 1994)

#### 2.4. Produção Anual de Energia e Fator de Capacidade

A produção anual de energia (AEP), dada na Eq. (8), define o quanto um parque eólico pode produzir de energia e seu cálculo é feito através da multiplicação da sua potencialidade pela distribuição da velocidade, durante o período de um ano dado em horas, ou seja, 8760 horas (Hau, 2013).

$$AEP = 8760 \int_{v_{in}}^{v_{out}} f(v)Pdv \quad (8)$$

O fator de capacidade (FC) é definido na Eq. (9), sendo a razão durante um período de um ano, da energia produzida por um aerogerador dividida pela energia gerada se operasse em potência nominal (Hau, 2013).

$$FC = \frac{AEP}{8760P_N} \quad (9)$$

### 3. METODOLOGIA

A fim de averiguar a influência do efeito esteira em cada aerogerador sobre a potência total produzida por um parque eólico, desenvolveu-se um algoritmo no *Software Matlab* que recebe os dados da velocidade do vento para criação de gráficos relacionados à curva de potência, distribuição de *Weibull* e produção anual de energia. Tendo a informação da potência produzida por um aerogerador para várias velocidades, dada pela curva de potência, e sabendo a distribuição da velocidade do vento ao longo de um ano pela função de *Weibull*, torna-se possível estimar a energia gerada em um ano, uma vez que para cada velocidade existe um valor correspondente a sua potência que pode ser fornecida, basta multiplicar a curva de potência pela curva de *Weibull*. Esse produto é, então, somado e resulta na produção anual de energia. O procedimento para a obtenção desses gráficos é ilustrado na Fig. 3.

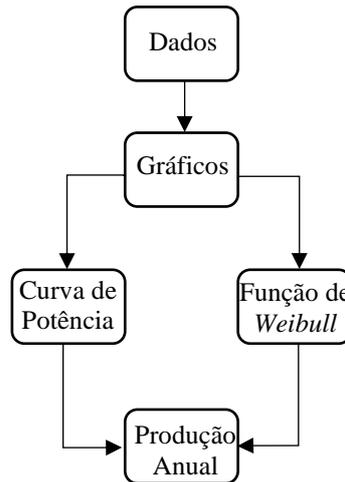


Figura 3 - Fluxograma para a obtenção dos gráficos.

Além disso, variando a distância entre os aerogeradores, foi possível estimar para qual distância tem-se uma maior produção energética. Comparou-se para cada distância a AEP de cada turbina e a produção total do parque, o fator de capacidade e a porcentagem da diminuição da velocidade do vento.

### 3.1. Seleção de Dados

As turbinas consideradas neste trabalho para fins de cálculo são da ENERCON E-40/6.44, com torres de 44 m, rotor de 40 m de diâmetro. Ao passo que os dados da velocidade do vento foram coletados por uma torre anemométrica, na altura de 40.4 m, instalada no município de Camocim, estado do Ceará, durante o período de 1º de Janeiro de 2005 até 31 de Dezembro de 2005. Esses dados são disponibilizados ao acesso público através do site da Secretaria da Infraestrutura do Governo do Estado do Ceará.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Recorreu-se ao modelo de Jensen (1984) para os cálculos da influência do efeito esteira. Por meio da Eq. (1) foi possível determinar o diâmetro da esteira gerada para diferentes distâncias entre os aerogeradores, como visto na Fig. 4. A Eq (3) foi utilizada para calcular o valor da velocidade que incidirá em uma turbina eólica a qual está suscetível ao efeito esteira de uma ou mais turbinas eólicas. Para realizar esses cálculos, o valor do coeficiente de decaimento da esteira ( $k_w$ ), dado pela Eq. (2), precisa ser estabelecido. Com o auxílio do *software WAsP*, como exposto na Tab. 2, o valor da rugosidade média do terreno ( $z_o$ ) foi admitido de 0,0003, considerando que os aerogeradores estão em um solo arenoso, consequentemente, o valor de  $k_w$  apresentou um valor de 0,04203.

Tabela 2 - Rugosidade dos terrenos obtidas pelo *software WAsP*.

Terreno	Rugosidade
Mar liso	0
Mar rugoso	0,0001
Areias e/ou dunas	0,0003
Floresta	0,40
Arbustos e/ou várias árvores	0,2
Cidade	0,4
Terrenos agrícolas	0,05

Fonte: (Sá, 2015)

Foi feita uma comparação entre a velocidade do vento que incide em uma primeira turbina com a que incide em uma segunda, a qual está suscetível ao efeito esteira, para analisar como ocorre a diminuição da velocidade supondo um parque eólico com uma dimensão de  $60D$ , em que  $D$  é o diâmetro do rotor da turbina eólica. Os dados da velocidade do vento do primeiro aerogerador são admitidos como sendo os coletados pelo anemômetro de Camocim e a velocidade incidente na segunda turbina, bem como as subsequentes, foram calculadas através da Eq. (3). Estes resultados estão expostos na Fig. 4.

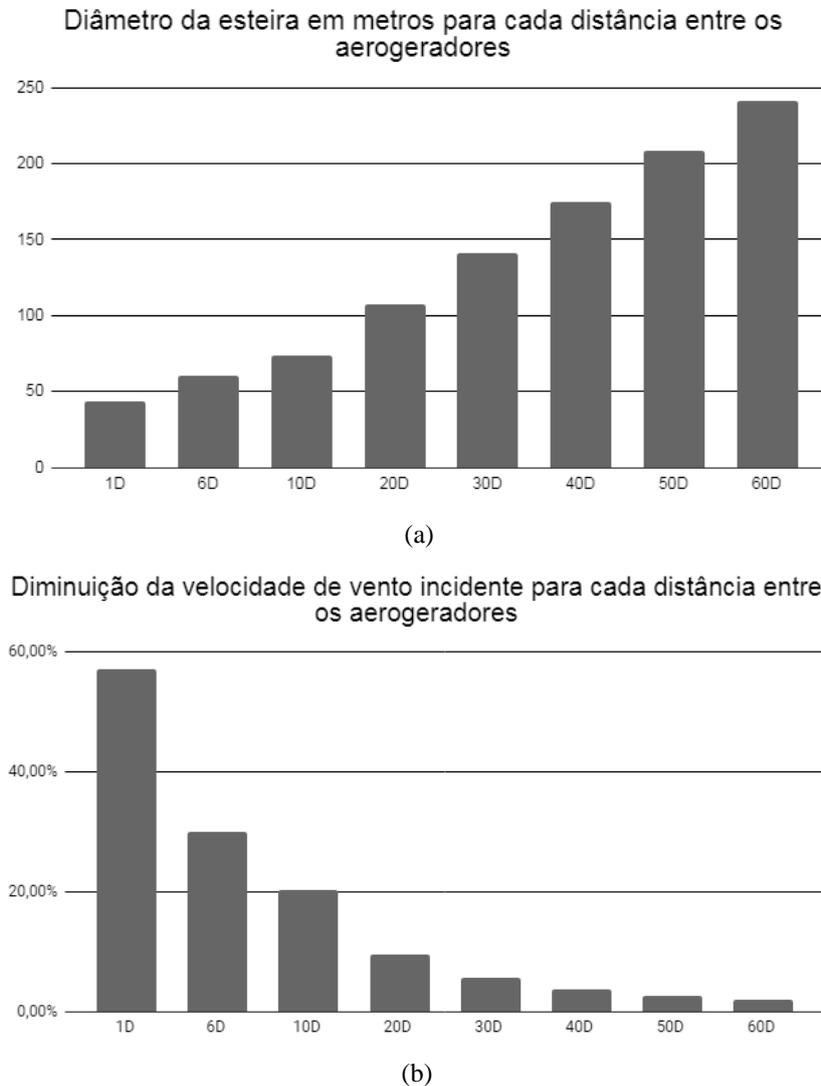


Figura 4 - Para cada distância entre os aerogeradores é possível ver (a) um aumento do diâmetro da esteira e o (b) comportamento da diminuição da velocidade do vento.

Como visto, mesmo com o diâmetro da esteira aumentando, a velocidade decresce de forma menos enfática. Apesar de um espaçamento maior entre as turbinas eólicas garantir que ocorra uma menor diminuição da velocidade incidente do efeito esteira, garantindo uma maior eficiência energética para o aerogerador, isso não significará uma maior produtividade para o parque eólico, pois a sua dimensão é limitada. Em função disso, ambos precisam ser analisados para encontrar o melhor rendimento energético. Observando a Fig. 5, mesmo com a AEP crescendo à medida que os aerogeradores estão mais afastados, ocorre uma redução da região disponível para a construção dos aerogeradores, o que afeta os níveis da produção total. Portanto, a distância seria de  $15D$ , em que pode se construir 5 turbinas com uma potência total de 4.343 GW.

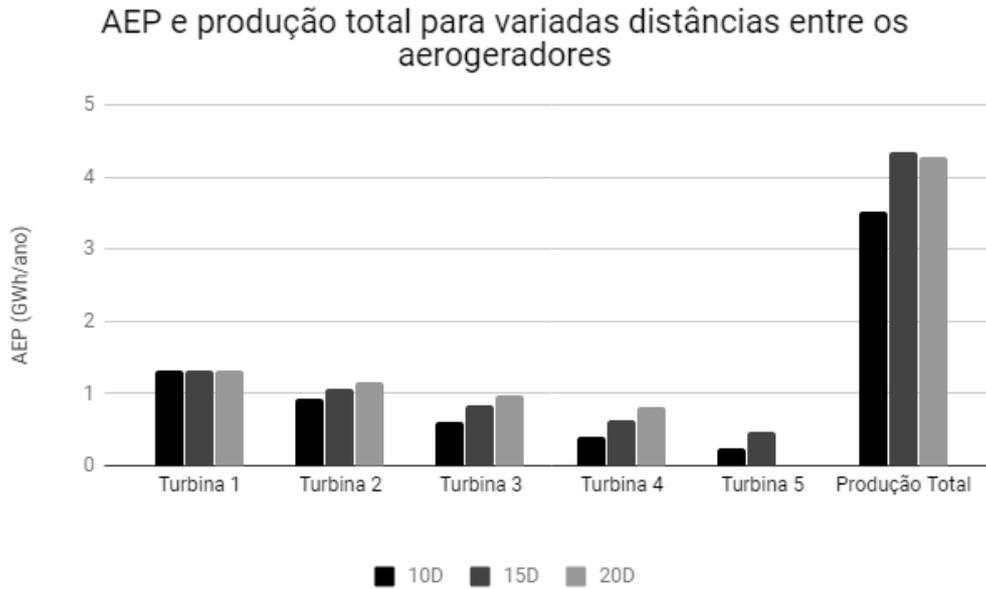


Figura 5 - Gráfico da AEP e produção total para variadas distâncias

A curva de potência pode ser determinada através da Eq. (4) e pode ser observado pela Fig. 6 que não há grande diferença no comportamento em cada turbina, com exceção do início da velocidade nominal. É através da curva potência e da distribuição de Weibull que poderá se construir o gráfico da produção anual de energia (AEP).

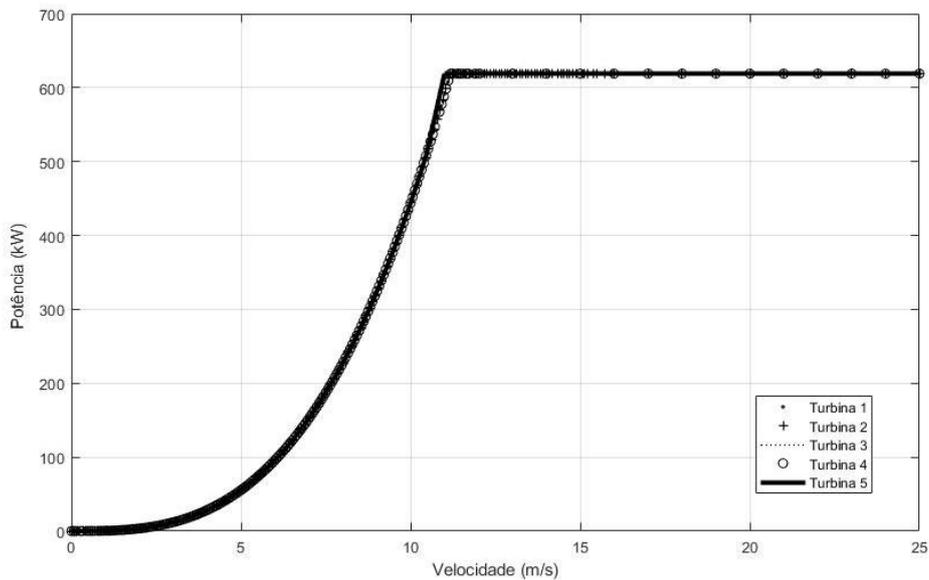


Figura 6 - Curva de potência das 5 turbinas.

Os parâmetros  $k$  e  $c$ , da distribuição de Weibull, podem ser calculados através das Eqs. (6) e (7), respectivamente. A partir dos valores da amostra, o valor encontrado para  $k$  foi de 2,5122, já o de  $c$  varia para cada turbina, uma vez que ele depende da função gama e da velocidade média, a qual sofre uma redução para cada aerogerador estudado (Pontes, 2016), por isso seus valores podem ser vistos na Tab. 3. Assim, é possível gerar o gráfico da distribuição de Weibull, utilizando a Eq. (5), observando a frequência da velocidade do vento em cada turbina ao longo do ano, como visto na Fig. 7.

Tabela 3 - Valores do fator de escala  $c$  para cada aerogerador.

Turbinas	Fator de escala (m/s)
Turbina 1	8.7897
Turbina 2	7.6434
Turbina 3	6.6465
Turbina 4	5.7797
Turbina 5	5.0259

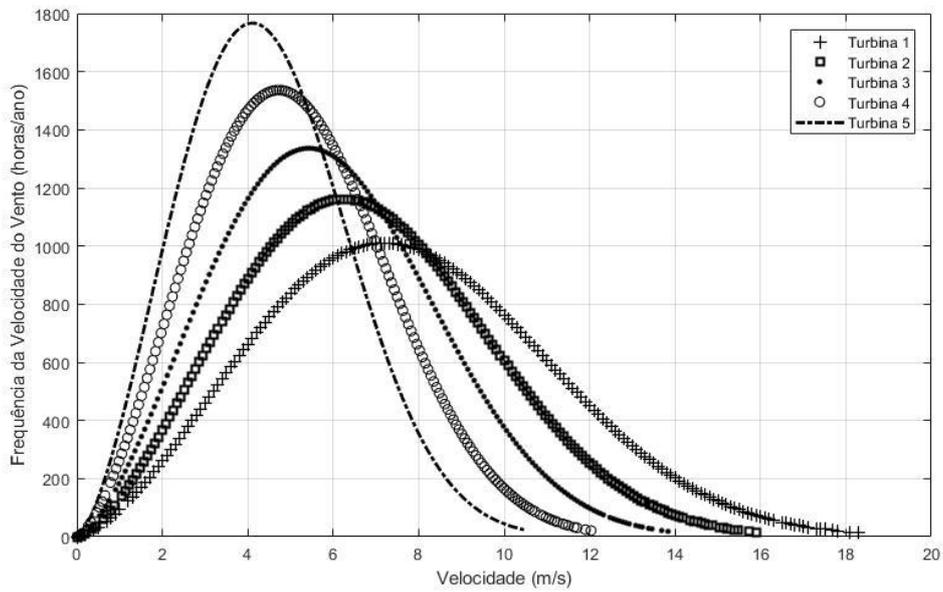


Figura 7 - Distribuição de Weibull para cada aerogerador.

Com base nesses resultados pode se obter uma estimativa da produção total de um parque eólico analisando o gráfico da AEP, o qual é dado pela multiplicação da frequência da velocidade pela potência. Observando a Fig. 8, vê-se a diminuição gradativa da produção da energia nas turbinas que estão mais suscetíveis ao efeito esteira.

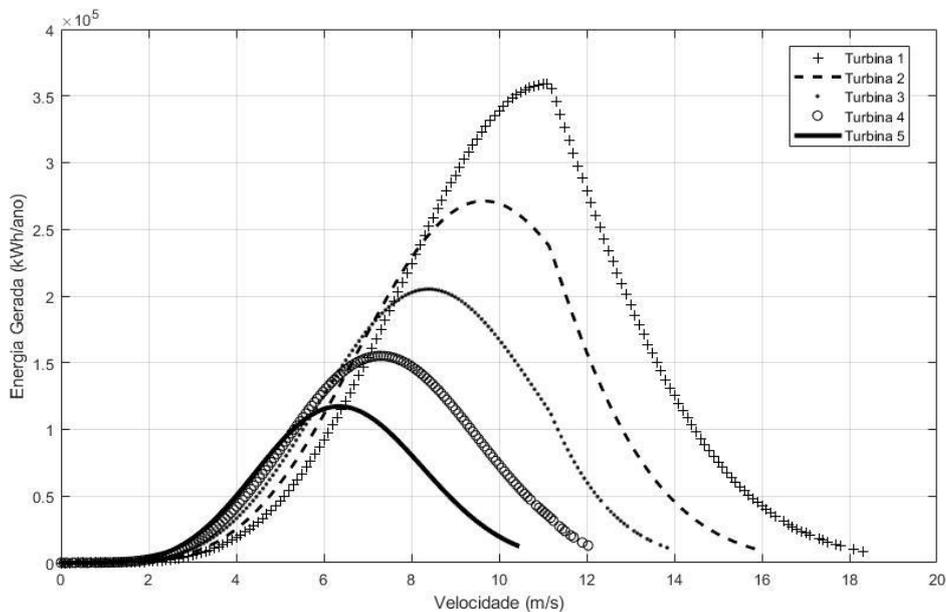


Figura 8 – Gráfico da produção anual de energia (AEP).

Os resultados produção de energia da Fig. 8 são expostos na Tab. 4, em que pode se visualizar a AEP e o FC de cada aerogerador.

Tabela 4 – Resultados da AEP e FC para cada turbina.

<b>Turbinas</b>	<b>AEP (GWh/ano)</b>	<b>FC (%)</b>
Turbina 1	1,320	32,81
Turbina 2	1,074	23,23
Turbina 3	0,836	15,71
Turbina 4	0,634	10,36
Turbina 5	0,480	6,81
Produção Total	4,343	-

## 5. CONCLUSÃO

Considerando a instalação de um parque eólico em uma região de 2400 m (60D) e com os dados da velocidade do vento, coletados por uma torre anemométrica no município de Camocim, é possível concluir que para uma viabilidade econômica o fenômeno do efeito esteira deve ser estudado, pois uma diminuição da velocidade do vento incidente, nos aerogeradores afetados pelo efeito esteira, é menos acentuada quando estão mais afastados entre si, entretanto, isso não garante que o parque estará produzindo a máxima quantidade de energia, uma vez que o número de turbinas eólicas será reduzido devido uma limitação de espaço. Além disso, um distanciamento menor entre os aerogeradores ocasiona em uma perda de geração de energia no parque devido ao efeito da esteira aumentar. Por isso, é necessário encontrar a distância que proporcionará a menor perda energética de forma que o resultado mais satisfatório para produção total de energia foi de 4,343 GWh/ano para aerogeradores distanciados a 600 m (15D).

## 6. REFERÊNCIAS

- Catalão, J. P., 2012. Electric power systems: advanced forecasting techniques and optimal generation scheduling. [S.l.]: CRC Press.
- Chang, T. P., 2011. Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application, *Applied Energy*, vol. 88, pp. 272-282.
- Choi, J.; Shan, M., 2013. Advancement of Jensen (park) wake model. In: *Proceedings of the European Wind Energy Conference and Exhibition*. [S.l.: s.n.], pp. 1–8.
- Couto, T. G; Farias, B., 2013. Posicionamento de aerogeradores em parque eólico utilizando Algoritmo Genético, Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Mecânica, UNB, Brasília.
- Hau, E., 2013. *Wind turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. 3ª. ed. [S.l.]: Springer.
- Jensen, N.O., 1984. A Note on Wind Generator Interaction. Risø-M-2411, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- Martínez, A. C., 2003. Principios de conversión de la energía eólica. In: *Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica*. Madrid: Rueda, S.L. p. 27–95.
- Mendonça, R. B., 2009. Modelagem de Usinas Eólicas através de um processo de Markov e Técnicas de Confiabilidade para a Estimativa Anual da Energia Produzida, Dissertação de mestrado, UFRN, Natal.
- Moskalenko, N.; Rudion, K.; Orths, A., 2010. Study of Wake Effects for Offshore Wind Farm Planning.
- Pontes, F.S., 2016. Análise do Efeito da Esteira em Aerogeradores sobre a Produção de Potência, Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Mecânica, UFRN, Natal.
- Renkema, D. J., 2007. Validation of wind turbine wake models: Using wind farm data and wind tunnel measurements, Master Thesis, Salzbergen.

- Rohatgi, J. S., 1994. Wind Characteristics - An analysis for the generation of wind power, Alternative Energy Institute, Texas.
- Sá, F. I. P., 2015. Efeito da esteira de aerogeradores sobre a produção do parque eólico de Beberibe, Dissertação de mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis.
- Vermeer, L.; Sorensen, J. N.; Crespo, A., 2003. Wind turbine wake aerodynamics. Progress in aerospace sciences, Elsevier, v. 39, n. 6, pp. 467-510.

## **ANALYSIS OS THE WAKE EFFECT ON POWER PRODUCTION IN WIND FARMS**

**Abstract.** *This paper presents the development of an algorithm to study the influence of the wake effect on the energy production of a wind farm. The algorithm evaluates the wind speed after passing through the aerogenerators propellers to determine the power curve. The variation of the wind speed, in the period of one year, was represented by the Weibull frequency distribution, a probability density function with two parameters denominated form factor and scale factor. After that by multiplying this function by the power curve, the annual energy production for each wind turbine can be calculated. Lastly, the results are compared for several intervals, considering an available region of 2400m, making it possible to find the spacing equivalent to 600 m where a higher energy yield occurs. It was concluded that the distance between the aerogenerators influence on the production capacity of a plant. Therefore, it is indispensable to evaluate the size of region available for the installation of a wind farm, the number of aerogenerators and the incident wind speed.*

**Key words:** *Wind Energy, Wake Effect, Energy Production*

## CERTIFICADO

Certificamos que o trabalho

ANÁLISE DO EFEITO ESTEIRA SOBRE A PRODUÇÃO DE ENERGIA EM PARQUES EÓLICOS

De autoria de

ANDRESSA AZEVEDO JAMAR, GABRIEL IVAN MEDINA TAPIA

Foi apresentado na modalidade pôster durante o **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, realizado entre os dias 17 a 20 de abril de 2018, no Centro de Eventos FAURGS, em Gramado/RS.



— VII —  
CONGRESSO  
BRASILEIRO  
DE ENERGIA  
SOLAR • 2018

Gramado/RS

João Tavares Pinho  
Presidente da ABENS

Arno Krenzinger  
Coordenador do CBENS

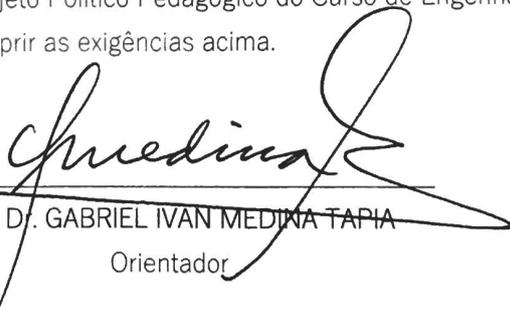


UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA

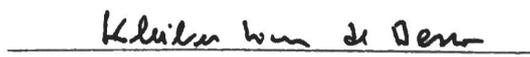
## ATA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Natal, 06 de novembro de 2019.

Aos seis dias do mês de novembro do ano de dois mil e dezenove, às 19:30 horas, na Sala 414 do CTEC, neste Campus Universitário, instalou-se a banca examinadora do Trabalho de Conclusão de Curso da discente ANDRESSA AZEVEDO JAMAR, matrícula 20180009144, do curso de Engenharia Mecânica. A banca examinadora foi composta pelos professores, GABRIEL IVAN MEDINA TAPIA, orientador, KLEIBER LIMA DE BESSA, examinador interno, MARIO ORESTES AGUIRRE GONZALES, examinador externo. Deu-se início à abertura dos trabalhos por parte do professor GABRIEL IVAN MEDINA TAPIA, que após apresentar os membros da banca examinadora, solicitou à candidata que iniciasse a apresentação do trabalho de conclusão de curso, intitulado "ANÁLISE DO EFEITO ESTEIRA SOBRE A PRODUÇÃO DE ENERGIA EM PARQUES EÓLICOS", marcando um tempo de trinta minutos para a apresentação. Concluída a exposição, o orientador, passou a palavra aos examinadores para argüirem a candidata; após o que fez suas considerações sobre o trabalho em julgamento; tendo sido APROVADA, a candidata, conforme as normas vigentes na Universidade Federal do Rio Grande do Norte. A versão final do trabalho deverá ser entregue à Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, no prazo de 7 dias; contendo as modificações sugeridas pela banca examinadora. Conforme o que rege o Projeto Político Pedagógico do Curso de Engenharia Mecânica da UFRN, a candidata não será aprovada se não cumprir as exigências acima.



Prof. Dr. GABRIEL IVAN MEDINA TAPIA  
Orientador



Prof. Dr. KLEIBER LIMA DE BESSA  
Examinador interno



Prof. Dr. MARIO ORESTES AGUIRRE GONZALES  
Examinador externo