

CÁLCULO DA DENSIDADE DE POTÊNCIA EÓLICA E ANÁLISE DAS CORRELAÇÕES DE LONGO ALCANCE EM SÉRIES TEMPORAIS DA VELOCIDADE DO VENTO EM FORTALEZA-CE

Antônio Fernandes Bandeira Neto, afbna.fbna@gmail.com¹

Max André Araújo Ferreira, maxaaferreira@gmail.com¹

Francisco de Assis Leandro Filho, leandrofilho@unifor.br¹

Bruno Aragão Martins de Araújo, brunoaragao84@hotmail.com¹

Rodrigo Alves Patrício, rodrigo.patricio@unifor.br¹

Francisco dos Santos Cavalcante Junior, juniornum@gmail.com¹

Clídio Richardson Gonçalves de Lima, clidio.lima@unifor.br¹

¹Universidade de Fortaleza - UNIFOR, leandrofilho@unifor.br

Resumo: O uso da energia eólica no cenário brasileiro tem ocorrido de maneira crescente por possuir inúmeras vantagens. Dentre estas, destacam-se a redução de emissão de gases do efeito estufa e a característica renovável da energia eólica, devido ao uso da velocidade do vento para gerar energia. Entretanto, um dos passos necessários para aproveitar essa energia através das turbinas eólicas modernas de maneira mais eficiente, é a realização de análises estatísticas. Neste trabalho, será avaliado a densidade de potencial eólico da cidade de Fortaleza, no estado do Ceará, após a aplicação de alguns tratamentos estatísticos. Os dados de velocidade do vento caracterizam o ano de 2015 e são fornecidos por uma das estações do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) localizada em Fortaleza. Para o tratamento dos dados será utilizada a função de densidade de probabilidade (FDP) da distribuição Weibull, uma distribuição de probabilidade contínua. Os dados obtidos também serão submetidos aos métodos Detrended Fluctuation Analysis (DFA) e Rescaled Range Analysis (R/S) para se quantificar correlações de longo prazo observando as características do expoente de Hurst.

Palavras-chave: Velocidade do Vento, Distribuição de Weibull, Rescaled Range, Detrended Fluctuation Analysis, Densidade de Potencial Eólico.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo

A energia eólica tem sido alvo de investimentos e estudos científicos em diversos países inclusive no Brasil. De acordo com a REN21 (*Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*), o Brasil é o quarto país que mais investiu no aumento de sua capacidade de energia eólica em 2014, atrás da China, da Alemanha e dos Estados Unidos. Dentre os motivos para se investir na energia eólica, dá-se bastante ênfase à redução dos gases do efeito estufa na produção de energia elétrica e a sua característica renovável e limpa. Por meio de dados analisados pela GWEC (*Global Wind Energy Council*, 2012) e *Greenpeace*, o nível de redução de emissão de CO₂ acumulado, estimado de maneira moderada, poderá superar 7512 milhões toneladas no ano de 2020 e 24132 milhões toneladas no ano 2030 ("Fig. 1").

Ademais, devido ao tempo necessário para que a natureza produza combustíveis fósseis e ao uso constante e demasiado dos mesmos, os investimentos tendem a aumentar. Isso pode ser observado num estudo realizado pela EWEA (*The European Wind Energy Association*), ao comparar dados em euro por megawatt hora, relativos ao uso de gás, carvão, nuclear, eólica (*OnShore*) e eólica (*OffShore*) como fontes de energia elétrica ("Fig. 2").

Entretanto, para se instalar usinas eólicas aproveitando de maneira eficiente o potencial das turbinas eólicas modernas, é necessário o conhecimento da densidade de potencial eólico e do comportamento do vento local. Neste artigo, temos como objetivo, por meio de dados de velocidade do vento fornecidos por uma das estações do INMET, localizada em Fortaleza-CE (latitude: -3,81°; longitude: -38,52°; altitude: 26,45m), analisar a densidade de potencial eólico, o comportamento da função densidade de probabilidade contínua de Weibull, e a correlação dos dados por meio dos métodos *Rescaled Range* e *Detrended Fluctuation Analysis*.

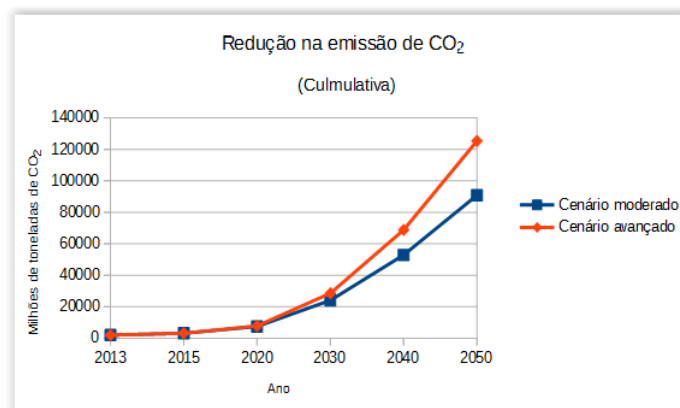


Figura 1: Acúmulo da redução da emissão de CO₂ por ano no mundo. Global Wind Energy Outlook 2012.

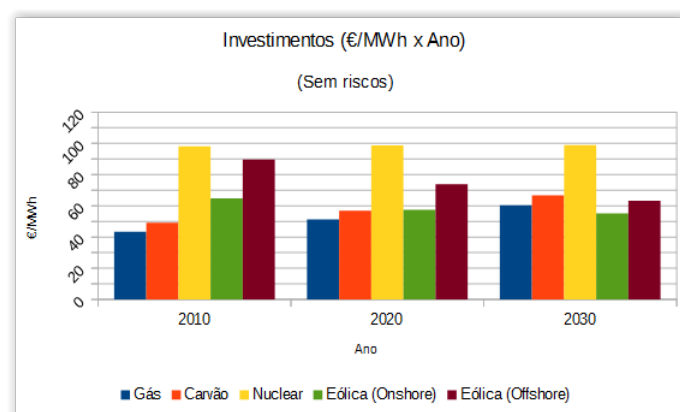


Figura 2: Comparação entre custos (€) por potência (MWh) por ano. EWEA Electricity Cost Calculator.

1.2 Distribuição de Weibull

Proposta originalmente por Wallodi Weibull, durante o século XX, a distribuição de Weibull começou como uma distribuição de probabilidade contínua de dados relacionados ao tempo de falha em metais devido a fadiga. Sua relação com a velocidade do vento, como variável aleatória, demonstra resultados satisfatórios, devido à forte relação entre a variável e os parâmetros da distribuição de Weibull (Hennessey e Joseph, 1977).

A função densidade de probabilidade (FDP) de Weibull pode ser definida por meio de dois parâmetros: de escala, " c ", e de forma, " k ". O parâmetro de escala está ligado à compressão da curva, ao passo que, o parâmetro de forma está ligado à forma da curva. Na "Fig. 3", pode-se observar o comportamento das curvas variando um dos parâmetros e mantendo o outro constante:

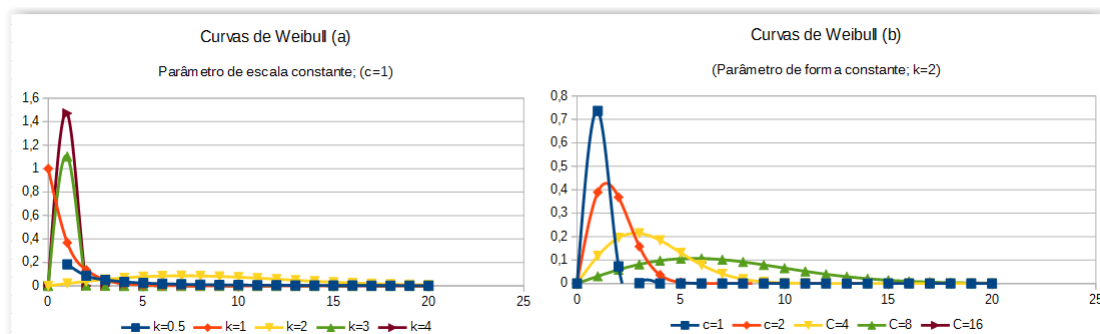


Figura 3: (a) O parâmetro de forma varia enquanto o parâmetro de escala é mantido. (b) O parâmetro de forma é mantido enquanto o parâmetro de escala varia. Dados utilizados para a demonstração gráfica: Paracuru, janeiro, 2006, INMET.

Torna-se possível a análise das variações nas formas e nas escalas da curva, diretamente, através da equação da FDP

de Weibull em função da velocidade, do parâmetro de forma e do parâmetro de escala, respectivamente:

$$f(v; k; c) = \begin{cases} \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} & v \geq 0 \\ 0 & v < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Para o cálculo dos parâmetros, há diversos modelos matemáticos. Entretanto, para este artigo, o modelo matemático escolhido foi o *Power Density Method* (PD) (Akdağ e Dinler, 2009), por possuir um bom desempenho quando aplicado em Camocim-CE (Neto e Falcão, 2012).

Para se chegar a uma relação entre o parâmetro de forma e a velocidade média, " v_m ", faz-se necessária a função gama " Γ ", e os momentos da distribuição, " E ", que podem ser definidos como:

$$\Gamma(m) = \int_0^{\infty} t^{m-1} \cdot e^{-t} \cdot dt \quad (2)$$

$$E(v) = \int_0^{\infty} v \cdot f(v) \cdot dv \quad (3)$$

Concluindo-se:

$$v_m = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (4)$$

Por meio do PD, o parâmetro de forma pode ser encontrado da seguinte maneira:

$$k = 1 + \frac{3,69}{(E_{pf})^2} \quad (5)$$

Onde " E_{pf} " é determinado como *Energy Pattern Factor* que, por sua vez, pode ser obtido por:

$$E_{pf} = \frac{(v^3)m}{(v_m)^3} \quad (6)$$

1.3 Rescaled Range (R/S)

Desenvolvido pelo hidrólogo Harold Edwin Hurst, após observar por anos os fluxos de saída e entrada de água nas proximidades do rio Nilo, o método R/S surgiu com a finalidade de se identificar a persistência a longo prazo da tendência do volume de um reservatório por meio de séries temporais estacionárias (Feder, 2013).

Para chegar ao resultado final da relação proposta por Hurst, utilizando a velocidade do vento, " v ", como variável aleatória, deve-se considerar uma série temporal original, T , dividindo-a em " n " segmentos inteiros de período τ , sem sobreposição:

$$n = \text{int}\left(\frac{T}{\tau}\right) \quad (7)$$

Onde cada segmento é nomeado por uma variável " x ", tal que x seja um inteiro entre 1 e n . Então, encontra-se a média para cada período, "Eq. (8)", e, em seguida, integra-se sua diferença com suas entradas (diferença acumulada), "Eq. (9)":

$$\bar{v}_x = \frac{1}{\tau} \cdot \sum_{t=1}^{\tau} v_{xt} \quad (8)$$

$$Y_x(t) = \sum_{i=1}^t (v_{xi} - \bar{v}_x) \quad \{t \in \mathbb{Z} \mid 1 \leq t \leq \tau\} \quad (9)$$

O método R/S baseia-se numa relação entre o expoente de Hurst, a série temporal original, o alcance, " R ", e o desvio padrão, " S ". Para um período, temos seu desvio padrão populacional, "Eq. (10)", e seu alcance, "Eq. (11)", baseado no desvio entre a diferença acumulada máxima, " $Y_x(t)_{max}$ ", e a diferença acumulada mínima, " $Y_x(t)_{min}$ ":

$$S_x(t) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (v_{xt} - \bar{v}_x)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$R_x(t) = Y_x(t)_{max} - Y_x(t)_{min} \quad (11)$$

Assim, a função de flutuação de Hurst, " H ", é dada por:

$$F_{RS} = \frac{1}{n} \cdot \sum \left[\frac{R_x(T)}{S_x(t)} \right] \sim \tau^H \quad (12)$$

Neste artigo, para se quantificar as correlações, o expoente de Hurst assumirá um dos seguintes casos (Mandelbrot e Van Ness, 1968):

- I. Antipersistente, se $0 < H < 1/2$.
- II. Browniano, se $H = 1/2$.
- III. Persistente, se $1/2 < H < 1$.

1.4 Detrended Fluctuation Analysis (DFA)

Diferentemente do método R/S, o método DFA apresenta um modelo de quantificação de correlações não estacionárias, justificada por possíveis alterações na variância conjunta ao longo da série temporal. Segundo Peng *et al.* (1994) a análise realizada pelo DFA evita detecções espúrias de aparentes correlações de longo alcance.

Inicialmente, deve-se obter a média da série original, "Eq. (13)", para então, calcular seus desvios acumulados, "Eq. (14)":

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \cdot \sum_{t=1}^T v_t \quad (13)$$

$$Z(k) = \sum_{t=1}^k (v_t - \bar{v}) \quad \{k \in \mathbb{Z} \mid 1 \leq k \leq T\} \quad (14)$$

De maneira semelhante ao método R/S, divide-se os segmentos "k" da grande série em intervalos iguais e não sobre-postos, "Eq. (7)". Logo após, retira-se "Pm(k,τ)" (um ajuste polinomial de ordem "m") dos segmentos, obtendo-se:

$$\tilde{Z}(k, \tau) = Z(k) - P_m(k, \tau) \quad (15)$$

Para, logo, conclui-se que a variância sem tendência para cada segmento da série original:

$$F_{DFAm} = \left\{ \frac{1}{\tau} \cdot \sum_{t=1}^{\tau} [\tilde{Z}(k, \tau)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \sim \tau^{\alpha} \quad (16)$$

O expoente α (self-similar signal) possui as seguintes propriedades (Hardstone *et al.* (2012)):

- I. Antipersistente, se $0 < \alpha < 1/2$.
- II. Browniano, se $\alpha = 1/2$.
- III. Persistente, se $1/2 < \alpha < 1$.

Na "Figura 4" apresentada no trabalho de Hardstone *et al.* (2012) pode-se observar a mesma série temporal, mas de duas maneiras diferentes, com tendência (vermelho) e sem tendência (azul):

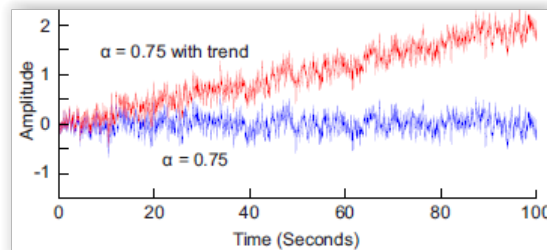


Figura 4: Demonstração de uma mesma série temporal com tendência (vermelho) e sem tendência (azul). Hardstone *et al.* (2012).

1.5 Densidade de potencial eólico

A densidade de energia do vento é um dos fatores mais importantes para se analisar o potencial eólico local. Para calculá-la, a partir da energia cinética de uma massa de ar, utiliza-se a seguinte expressão:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^3 \quad (17)$$

Em que " ρ " é a densidade relativa do ar e " v_m " é a velocidade média. Ambas variáveis possuem proporção direta com a densidade de potência, comprovando assim a importância de se conhecer o comportamento do vento local. Além disto, pode-se reescrever a densidade de potência eólica em função dos parâmetros de Weibull por meio do terceiro momento na relação obtida pela "Eq. (4)":

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (18)$$

2. RESULTADOS

2.1 Distribuição de Weibull

Na "Figura 5", pode-se observar as curvas de densidade de probabilidade de Weibull separada de três em três meses consecutivos e um comparativo entre as curvas mensais e a curva anual:

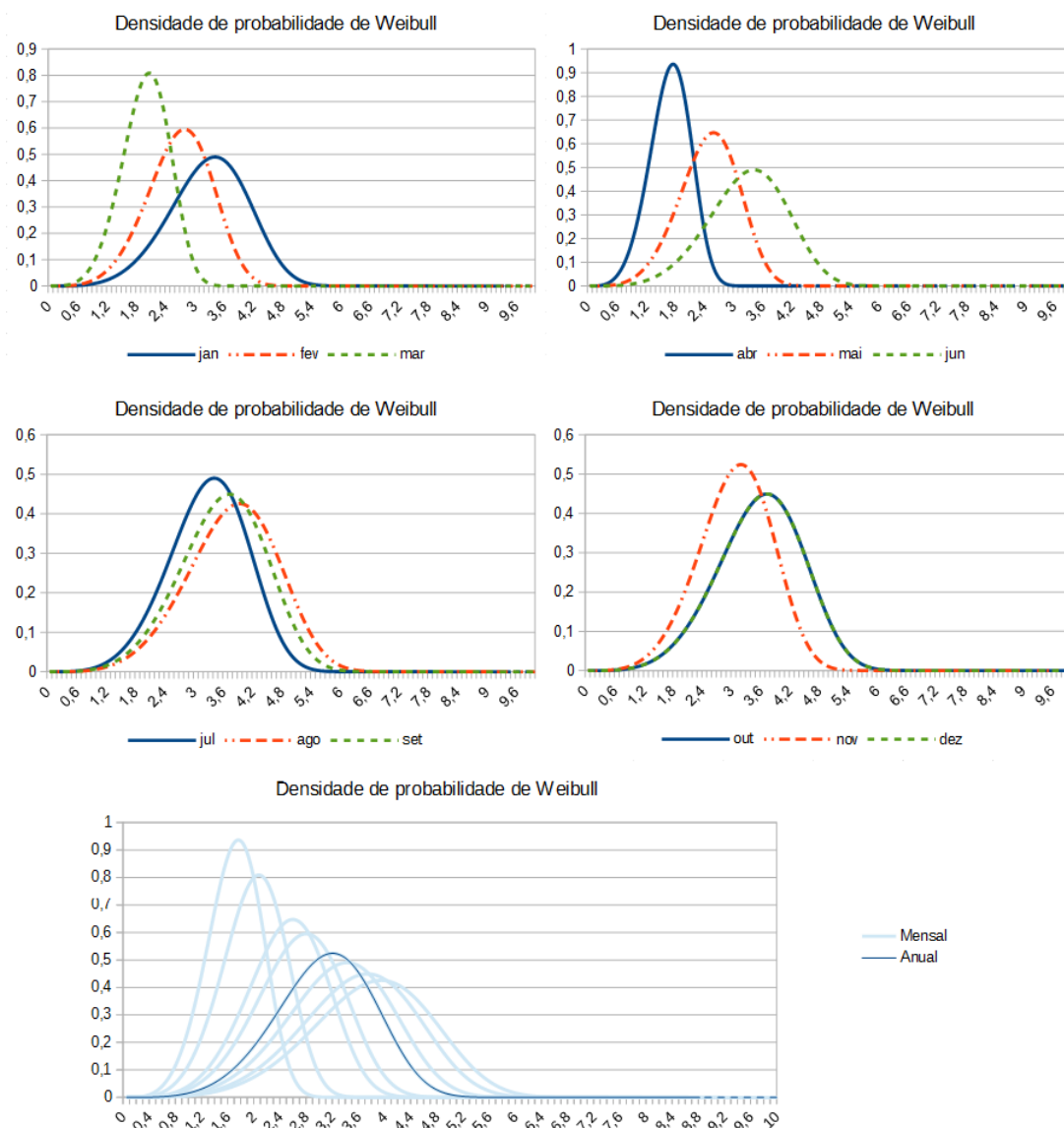


Figura 5: FDP de Weibull. Mensais e anual. Dados: INMET. Localização Fortaleza-CE. 2015.

Na "Tabela 1", podem-se verificar as velocidades média e máxima com suas respectivas frequências baseadas em cada curva observada nos gráficos da "Fig. 5".

Os dados da "Tab. 1" mostram uma frequência anual estável em torno da média, com aproximadamente 52% das variáveis acima da média, com os parâmetros de forma e escala iguais a 4,69 e 3,6074724605, respectivamente. Também, as frequências referentes às médias foram todas superiores a 42%. Ademais, pode-se denotar que as médias mensais com frequências de velocidade média abaixo de 50% possuem maiores frequências para as velocidades máximas. Então, pode-se inferir que o decréscimo na taxa da vmed está relacionado diretamente com o acréscimo de taxa da vmax, o que, para efeitos de densidade de potencial eólico, pode contribuir positivamente.

Tabela 1: Dados de velocidades média e máxima com suas frequências baseadas na curva de densidade de probabilidade de Weibull. Fortaleza-CE, 2015.

Período	vmed (m/s)	fmed	vmax (m/s)	fmax
Janeiro	3,3	0,4844279306	6	0,0001615459
Fevereiro	2,7	0,5884570413	5,8	1,501114730E-09
Março	2	0,7993060856	5	4,317470410E-20
Abril	1,7	0,9259841915	5,3	3,696288168E-53
Maió	2,5	0,6394448685	5	6,618601579E-07
Junho	3,3	0,4844279306	6	0,0001615459
Julho	3,3	0,4844279306	5	0,0426104879
Agosto	3,8	0,4206874135	6,6	0,0009675531
Setembro	3,6	0,4438453573	6,7	0,000046629
Outubro	3,6	0,4438453573	6,2	0,0014066902
Novembro	3,1	0,5191904122	5,1	0,006179268
Dezembro	3,6	0,4438453573	6,2	0,0014066902
Anual	3,3	0,520092814	6,7	2,538772037E-10

2.2 Rescaled Range (R/S)

Para a análise de correlação, é necessário o conhecimento do número de medições realizadas. Na "Fig. 6", pode-se observar a série temporal original com suas 924 medições de velocidades do vento:

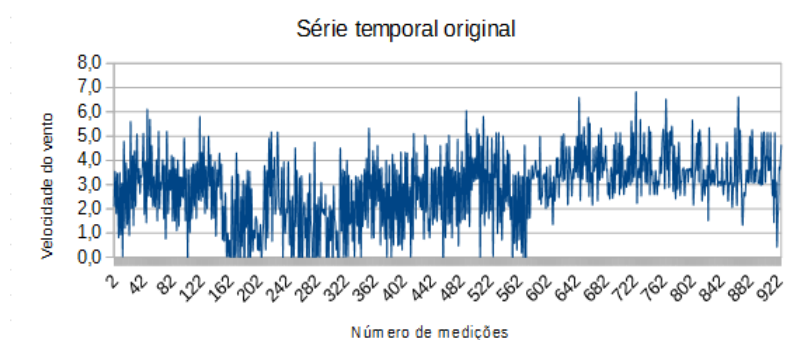


Figura 6: Série temporal original. Variável: velocidade do vento (m/s). Número de medições: 924.

Por meio do software MATLAB, foram obtidos os resultados para diversas divisões da série original e foi elaborado o gráfico apresentado na "Fig. 7":

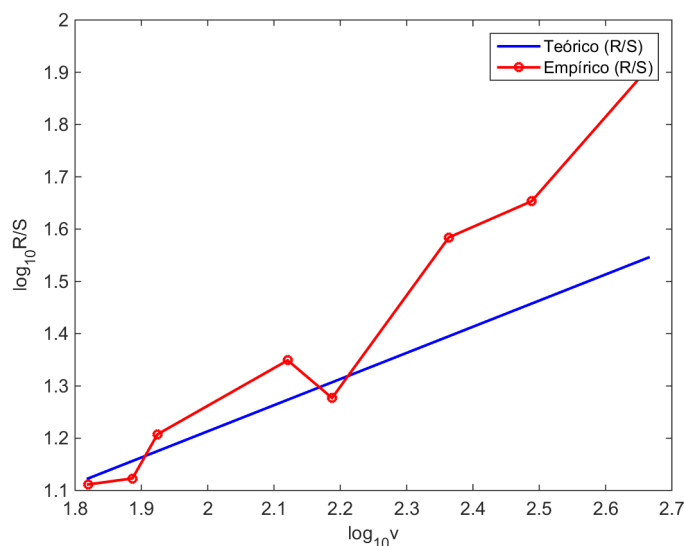


Figura 7: Linhas geradas a partir da relação log-log entre a função R/S e o número de divisões.

Para as linhas que resultam no gráfico da reta empírica acima, utilizou-se 8 divisões (n) – entre 66 e 462 – para a série temporal original. Encontramos, para o expoente de Hurst, o valor 0,9166. A reta teórica representa apenas uma série que segue um movimento Browniano ($H = 0,5$).

O valor encontrado, $H = 0,9166$, conclui uma correlação positiva da velocidade do vento em Fortaleza a 26,45 m de altitude durante o ano de 2015.

2.3 Detrended Fluctuation Analysis (DFA)

Para a série temporal original ("Fig. 6"), foi considerado 17 divisões (n) – entre 11 e 462 – e, através do MATLAB, obteve-se o gráfico apresentado na "Fig. 8":

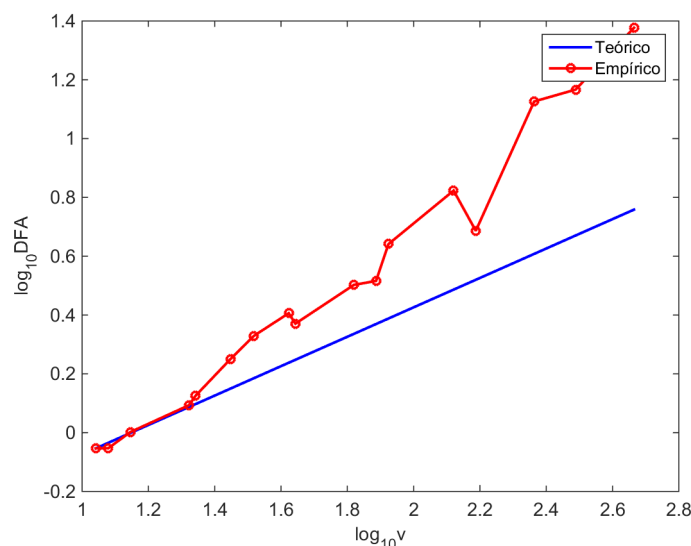


Figura 8: Linhas geradas a partir da relação log-log entre a função DFA-1 ($m=1$) e o número de divisões.

Como resultado para o coeficiente α , encontramos 0,8635. Novamente, a reta teórica representa um movimento Browniano ($\alpha = 0,5$).

Assim como no resultado obtido por meio do método R/S, no método DFA, concluímos uma correlação positiva da velocidade do vento ao longo da série temporal. Significando assim, para ambos os casos (R/S e DFA), que a velocidade tende a persistir, mesmo com um incremento temporal.

2.4 Densidade de potencial eólico

Por meio da equação que oferece a potência disponível no ar, "Eq. (17)" e, utilizando-se a massa específica do ar como $1,17 \text{ kg/m}^3$ para 30°C à pressão atmosférica Fox *et al.* (2014), pode-se indicar os seguintes valores na Tab. 2:

Tabela 2: Dados mensais de velocidade média e densidade de potência.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
vmed (m/s)	3,3	2,7	2	1,7	2,5	3,3
P (W/m ²)	21,02314	11,51455	4,68	2,874105	9,140625	21,02314
Mês	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
vmed (m/s)	3,3	3,8	3,6	3,6	3,1	3,6
P (W/m ²)	21,02314	32,10012	27,29376	27,29376	17,42773	27,29376

No caso da velocidade média anual, 3,3 m/s, obtêm-se o mesmo valor encontrado para o meses de janeiro, junho e julho, 21,02314 W/m².

O gráfico da "Fig. 9" mostra o crescimento da densidade de potência eólica que, nesta escala e pressão (atmosférica), demonstram variação desprezível entre 25°C e 30°C :

A partir da obtenção da densidade de potência eólica através do parâmetro de forma e Weibull, "Eq. (18)", pode-se observar as curvas de densidade de potência apresentadas na "Fig. 10":

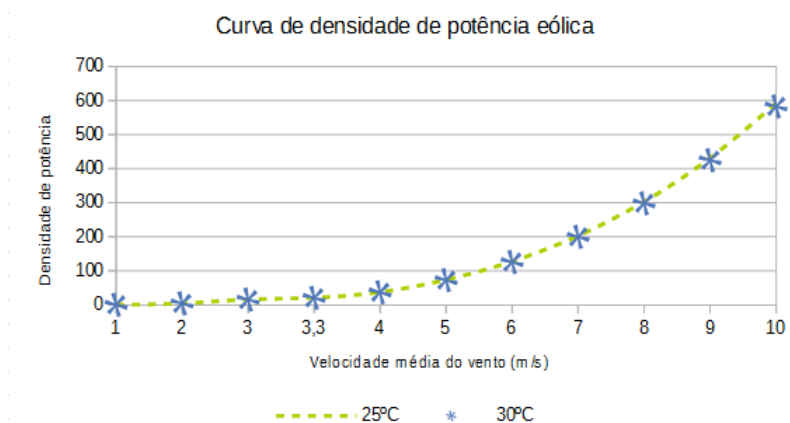


Figura 9: Densidade de potência eólica em função da velocidade média vento para 25 °C e 30°C.

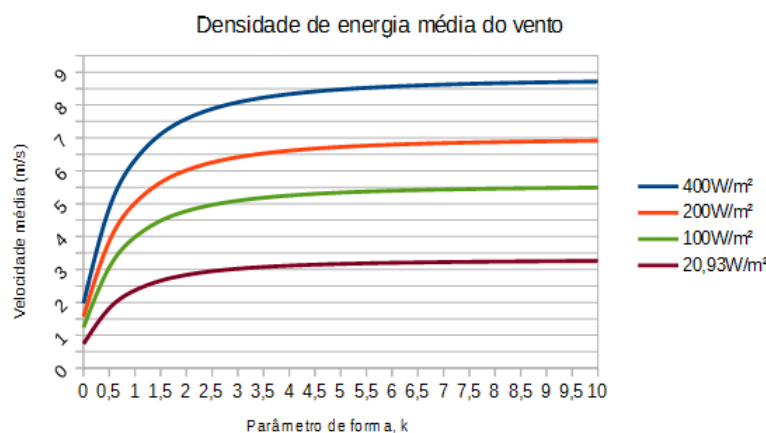


Figura 10: Curvas de densidade de energia do vento, resultantes da relação entre a velocidade média e o parâmetro de forma de Weibull.

3. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à coordenação de Engenharia Mecânica junto ao Núcleo de Pesquisas Tecnológicas da Universidade de Fortaleza (UNIFOR) e aos organizadores do evento pela oportunidade de participação no CONEM 2016.

4. REFERÊNCIAS

- Akdağ, S.A. e Dinler, A., 2009. "A new method to estimate weibull parameters for wind energy applications". *Energy conversion and management*, Vol. 50, pp. 1761–1766.
- Feder, J., 2013. "Fractals". *Springer Science & Business Media*.
- Fox, R.W., Pritchard, P.J. e McDonald, A.T., 2014. *Introdução à mecânica dos fluidos*. Grupo Gen-LTC, 8th edition.
- Global Wind Energy Council, G., 2012. "Global wind energy outlook 2012". *Global Wind Energy Council- GWEC*, November.
- Hardstone, R., Poil, S.S., Schiavone, G., Jansen, R., Nikulin, V.V., Mansvelder, H.D. e Linkenkaer-Hansen, K., 2012. "Detrended fluctuation analysis: a scale-free view on neuronal oscillations". *Scale-free Dynamics and Critical Phenomena in Cortical Activity*, p. 75.
- Hennessey, J. e Joseph, P., 1977. "Some aspects of wind power statistics". *Journal of applied meteorology*, Vol. 16, No. 2, pp. 119–128.
- Mandelbrot, B.B. e Van Ness, J.W., 1968. "Fractional brownian motions, fractional noises and applications". *SIAM review*, Vol. 10, No. 4, pp. 422–437.
- Neto, M. e Falcão, H., 2012. "Análise comparativa da eficiência de sete métodos numéricos para determinação dos parâmetros da curva de weibull utilizando dados de velocidade do vento e de potência eólica". *MAIA*.
- Peng, C.K., Buldyrev, S.V., Havlin, S., Simons, M., Stanley, H.E. e Goldberger, A.L., 1994. "Mosaic organization of dna nucleotides". *Physical Review E*, Vol. 49, No. 2, p. 1685.

5. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DENSITY CALCULATION OF WIND POWER AND ANALYSIS OF LONG RANGE CORRELATIONS IN TIME SERIES OF WIND SPEED IN FORTALEZA-CE

Antônio Fernandes Bandeira Neto, afbn.afbn@gmail.com¹

Max André Araújo Ferreira, maxaaferreira@gmail.com¹

Francisco de Assis Leandro Filho, leandrofilho@unifor.br¹

Bruno Aragão Martins de Araújo, brunoaragao84@hotmail.com¹

Rodrigo Alves Patrício, rodrigo.patricio@unifor.br¹

Francisco dos Santos Cavalcante Junior, juniornum@gmail.com¹

Clídio Richardson Gonçalves de Lima, clidio.lima@unifor.br¹

¹Universidade de Fortaleza - UNIFOR, leandrofilho@unifor.br

Resumo: *The use of wind energy in the Brazilian scene has been growing way to possess numerous advantages. Among these, there is the reduction of emission of greenhouse gases and the renewable characteristic of wind power due to wind speed use to generate energy. However, one of the steps needed to harness this energy using modern wind turbines more efficiently, is to perform statistical analysis. In this work, the wind potential density of Fortaleza will be evaluated in the state of Ceará, after applying some statistical treatments. The wind speed data that characterize the year 2015 are provided by one of the stations INMET (National Meteorological Institute) located in Fortaleza. For the treatment of the data will be used probability density function (PDF) of the Weibull distribution, a continuous probability distribution. The data obtained are also subjected to the methods Detrended Fluctuation Analysis (DFA) and Rescaled Analysis Ranger (R/S) to quantify long-term correlations observing the characteristics of the Hurst exponente.*

Palavras-chave: *Wind Speed, Weibull Distribution, Rescaled Range, Detrended Fluctuation Analysis, Wind Potential Density*