

Modelagem multifractal da velocidade horária do vento no município de Patos, Paraíba

Kerolly K. F. Nascimento^{1†}, Fábio S. Santos², Diego A. Gomes³, Jader S. Jale⁴, Rayane S. Leite⁵, Tatijana Stosic⁶, Tiago A. E. Ferreira⁷

¹ Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE.

² Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE. E-mail: <fabio.sandropb@gmail.com>.

³ Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE. E-mail: <diegoalvesestatistica@gmail.com>.

⁴ Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE. E-mail: <jsj_ce@yahoo.com.br>.

⁵ Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE. E-mail: <rayferreiraleite@gmail.com>.

⁶ Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE. E-mail: <tastosic@gmail.com>.

⁷ Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE. E-mail: <tiago.espinola@ufrpe.br>.

Resumo: Nos últimos anos, as investigações acerca das propriedades da velocidade do vento têm se intensificado com o objetivo de alcançar um melhor aproveitamento dos ventos e redução de eventuais prejuízos decorrentes da instalação de parques eólicos em locais ineficazes à produção de energia eólica. Neste trabalho utilizamos o método Multifractal Detrended Fluctuation Analysis (MFDFA) aplicado aos registros horários de velocidade do vento durante o período de 21 de julho de 2007 a 30 de setembro de 2018 na cidade de Patos, sertão paraibano. Verificou-se uma velocidade média dos ventos de 3,367m/s, apontando que essa região apresenta um tímido potencial para geração de energia eólica, justificado, provavelmente, por sua localização vizinha ao município de Santa Luzia-PB, o qual apresenta características essenciais à instalação de uma usina eólica. Os resultados obtidos indicam comportamento de multifractalidade na base de dados analisada e persistência de longo alcance na velocidade do vento, sendo um indicativo para a necessidade de planejamentos que viabilizem a futura instalação de uma fazenda eólica em Patos.

Palavras-chave: Energia eólica; MFDFA; Persistência; Potencial.

Abstract: In recent years, investigations on wind speed properties has intensified in order to achieve a better use of the wind and reduction of possible losses arising from the installation of wind farms in places that are ineffective in wind energy production. In this work we used the Multifractal Detrended Fluctuation Analysis (MFDFA) method applied to hourly wind speed records during the period from July 21, 2007 to September 30, 2018 in the city of Patos, Sertao Paraiba. It was observed a mean wind velocity of 3,367m/s, indicating that this region presents a timid potential for wind energy generation, probably due to its neighboring location the municipality of Santa Luzia-PB, which presents characteristics essential to the installation of a wind farm. The results obtained indicate multifractal behavior in the analyzed database and long-range persistence in wind speed, being an indicative of the need for planning that will enable the future installation of a wind farm in Patos.

Keywords: Wind Energy; MFDFA; Persistence; Potential.

[†]Autor correspondente: <kerollyfn@gmail.com>.

Introdução

A velocidade do vento trata-se de uma variável atmosférica complexa e não-linear, sendo amplamente discutida em todo o mundo devido, especialmente, à sua importante contribuição à geração de energia proveniente de fontes renováveis. Seu papel na geração de energia têm sido crescente, à medida em que vem substituindo as fontes energéticas convencionais e não renováveis (GUIGNARD et al., 2019), como a água.

Uma outra justificativa para a difusão desse tipo de energia, trata-se da compra de energia eólica produzida, garantida pelos órgãos responsáveis através das políticas de incentivo dos governos de países como Alemanha e Dinamarca (pioneiros neste posicionamento) e Brasil, por exemplo. Este último, com o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA), vem encorajando empreendedores a ampliarem a produção de energia elétrica através de fontes alternativas (LEITE; FALCÃO; BORGES, 2006).

Deve-se observar, entretanto, que uma desvantagem no processo para geração de energia eólica é a irregular ou escassa disponibilidade de ventos fortes com velocidades constantes ao longo do ano. Sendo, portanto, importante estudar previamente o regime de ventos nos locais pre-indicados e considerados adequados à instalação de parques eólicos. Com isso, busca-se evitar gastos desnecessários e prováveis prejuízos.

No Brasil, o aproveitamento energético dos ventos na região Nordeste tem aumentado nos últimos anos, onde o estado do Rio Grande do Norte tem se mantido como maior produtor do país, seguido dos estados da Bahia, do Piauí, do Rio Grande do Sul e do Ceará (INVESTIMENTOS E NOTÍCIAS, 2018). Esse cenário contribuiu para que o Brasil subisse de posição no cenário mundial em desenvolvimento de energia eólica: ocupando, atualmente, a oitava posição no *ranking* internacional e ultrapassando países como Canadá - grande potência econômica - e ficando atrás da China (primeiro lugar) e dos Estados Unidos (segundo lugar) em geração de energia eólica (ABEEOLICA, 2018a).

Em particular, o estado da Paraíba tem sido investigado quanto à possibilidade de aproveitamento dos ventos para produção de energia eólica, pois essa região possui características que a classificam como detentora de alto potencial para a produção desse tipo de fonte energética. Por exemplo, próximo ao município de Santa Luzia-PB está sendo aguardada a construção do maior parque eólico da América Latina, com capacidade de 565 *megawatts* (MW) de potência (ABEEOLICA, 2018b) e favorecendo à redução do emprego de combustíveis fósseis para geração de energia a ser utilizada pela população local. Outras cidades do estado, como Patos, também podem ser vistas como portadoras de capacidade para se tornarem grandes polos de produção desse tipo de energia limpa (ABEEOLICA, 2017). Sendo necessário o estudo do regime de ventos do lugar para verificação desta possibilidade.

Dessa forma, com o objetivo de entender o comportamento das séries de velocidade do vento na cidade de Patos-PB e verificar se o vento desta localidade se caracteriza como persistente, sendo favorável à instalação de parque eólico na região, foi adotada a *Multifractal Detrended Fluctuation Analysis* (MF DFA). O MF DFA foi proposto para examinar características multifractais presentes em séries temporais não estacionárias (KANTELHARDT et al., 2002). Este método vem sendo empregado com êxito na análise multifractal da dinâmica de chuvas (STOSIC; STOSIC, 2006), em séries de finanças (YUAN; ZHUANG; JIN, 2009), processos fisiológicos (DUTTA et al., 2014) e em séries de velocidade do vento (TELESCA; LOVALLO, 2011), entre outros.

Sigmae, Alfenas, v.8, n.2, p. 238-247, 2019.

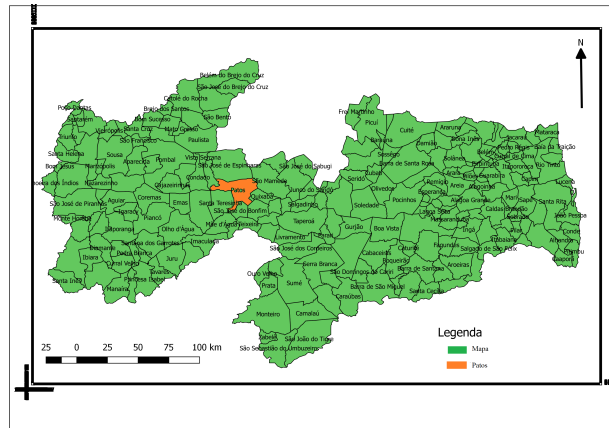
64^a Reunião da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS).

18^o Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agrônoma (SEAGRO).

Metodologia

Dados

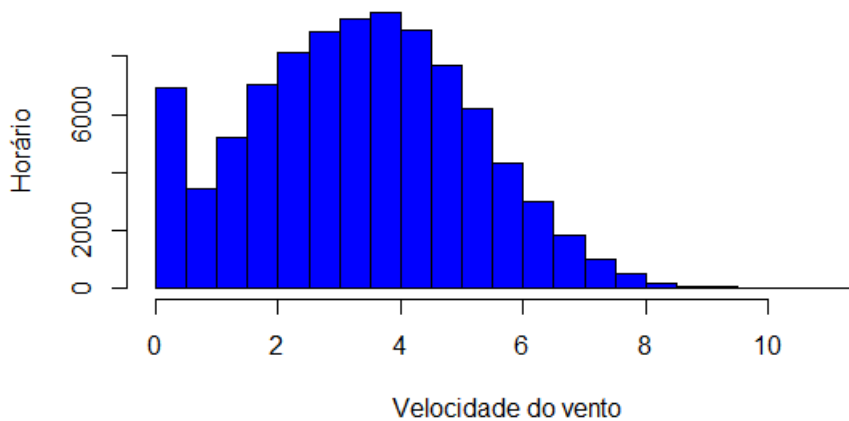
Nessa investigação foram utilizados dados horários de velocidade do vento, em metros por segundo (m/s), obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no período de 21 de julho de 2007 a 30 de setembro de 2018, totalizando 11 anos de observações. Essa base de dados é composta por informações da estação automática instalada no município em estudo e ilustrado na Figura 1. Todas as análises foram feitas utilizando o *software* R (R CORE TEAM, 2018).



Fonte: próprio autor

Figura 1: Localização geográfica do município de Patos na Paraíba.

Observa-se no histograma da base de dados, apresentado na Figura 2, que há um comportamento de bimodalidade na série de observações. Tal comportamento é característico das informações de velocidade do vento.



Fonte: próprio autor

Figura 2: Histograma da série de velocidade do vento para os dados estudados.

Sigmae, Alfenas, v.8, n,2, p. 238-247, 2019.

64ª Reunião da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS).
18º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agrônoma (SEAGRO).

Multifractal Detrended Fluctuation Analysis (MFDFA)

Sendo x_k , $k = 1, 2, \dots, N$, uma série temporal, o procedimento para realização do *Multifractal Detrended Fluctuation Analysis* (MFDFA) consiste nos cinco passos listados a seguir (KANTEHARDT et al., 2002; KAVASSERI; NAGARAJAN, 2005).

1. Integrar a série x_k formando a série $\sum_{i=1}^{i=k} [x_{(i)} - \bar{x}]$, com $k = 1, 2, \dots, N$ e \bar{x} é o valor médio da série.
2. Dividir a série y_k em $n_s = \text{int}(N/s)$ caixas não sobrepostas de comprimentos iguais (s). Já que o comprimento (N) da série, em geral, não é um inteiro múltiplo da escala temporal considerada, uma parte pequena no final da série pode não ser examinada no procedimento. Dessa maneira, é necessário realizar também a subdivisão da série y_k a partir da extremidade oposta. Com isso, são obtidos $2N_s$ segmentos.
3. Calcular a tendência polinomial local y_v através de um ajuste de mínimos quadrados da série e definir a variação correspondente segundo as equações a seguir:

$$F^2(s, v) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Y[(v-1)s + i] - y_v(i)\}^2, \quad v = 1, 2, \dots, N_s$$

e

$$F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Y[N - (v - N_s)s + i] - y_v(i)\}^2, \text{ para } v = N_{(s+1)}, \dots, 2N_s.$$

$y_v(i)$ é o polinômio de ajuste no seguimento v .

4. Calcular a média de todos os segmentos e obter a função de flutuação segundo $F_q(s) = \left\{ \frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} [F^2(v, s)]^{\frac{q}{2}} \right\}^{\frac{1}{q}}$, em que, em geral, o índice q pode assumir qualquer valor real, exceto zero.
5. Examinar gráficos log-log $F_q(s)$ em relação à escala de tempo (s) para cada valor de q e estabelecer o comportamento de escala das funções de flutuação. Se a série original x_i for correlata à lei de potência de longo alcance, $F_q(s)$ aumenta como uma lei de potência $F_q(s) \propto s^{(h_q)}$ para grandes valores de s .

Em séries temporais estacionárias, $h(2)$ é idêntico ao expoente de Hurst (H). Por isso, a função $h(q)$ é chamada de expoente de Hurst Generalizado. Para $q = 0$, o valor de $h(0)$ corresponde ao limite $h(q)$ quando $q \rightarrow 0$ e deve ser determinado através da média logarítmica

$$F_0(s) \equiv \exp \left\{ \frac{1}{4N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} \ln [F^2(s, v)] \right\} \propto s^{h_0}. \quad (1)$$

Dependendo da relação entre q e o expoente h_q , a série pode ser classificada em monofractal ou multifractal. Assim,

- se h_q é dependente de q e monotonicamente diminui à medida em que q aumenta, diz-se que a série é multifractal;

Sigmae, Alfenas, v.8, n.2, p. 238-247, 2019.

64ª Reunião da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS).
18º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agronômica (SEAGRO).

- se h_q é independente de q , conclui-se que a série é mono-fractal.

Aplicando-se a transformada de Legendre em séries multifractais, obtém-se o espectro da singularidade $f(\alpha)$ representando a dimensão do subconjunto da série que α caracteriza: basta relacionar o expoente de Rényi τ_q da equação $\tau_q = qh_q - 1$ com $\alpha = \frac{d\tau}{dq}$. Desse modo, $f(\alpha) = q\alpha - \tau(q)$, em que α é o expoente de Hölder. Os vários expoentes fractais presentes na série são observados a partir do espectro multifractal, que indica o quanto os mesmos são dominantes. O grau de multifractalidade da série pode ser mensurado quantitativamente pelo intervalo do expoente de Hurst generalizado, dado por $\max(h_q) - \min(h_q)$, e pela largura do espectro. As séries que apresentam maior espectro possuem mais multifractalidade (LAIB et al., 2018).

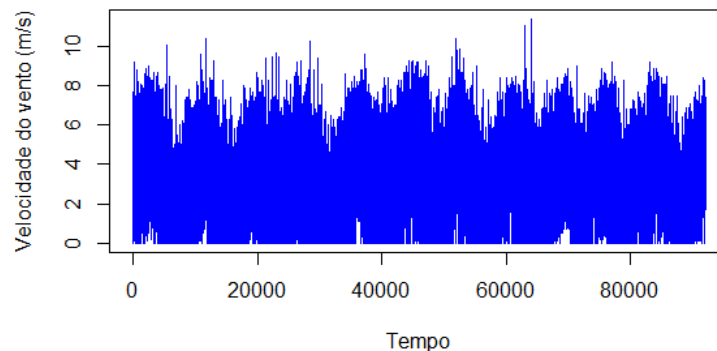
Resultados

A Tabela 1 exibe a estatística descritiva dos dados observados. Com uma média de 3,376 m/s e coeficiente de variação (CV) de 53,393% pode-se dizer que na localidade em estudo há uma alta dispersão das observações de velocidade do vento em torno da média, embora a mesma tenha um valor dentro do limite tolerado à instalação de usina eólica na região. A Figura 3 ilustra essas informações no período investigado.

Tabela 1: Análise descritiva das observações da velocidade do vento do município de Patos-PB.

| Mín. | 1° Qu. | Mediana | Média | 3° Qu. | Máx. | Desvio Padrão | CV% |
|-------|--------|---------|-------|--------|--------|---------------|--------|
| 0,000 | 2,100 | 3,400 | 3,376 | 4,700 | 11,400 | 1,803 | 53,393 |

Fonte: próprio autor



Fonte: próprio autor

Figura 3: Série de velocidade do vento de 21/07/07 a 30/09/18.

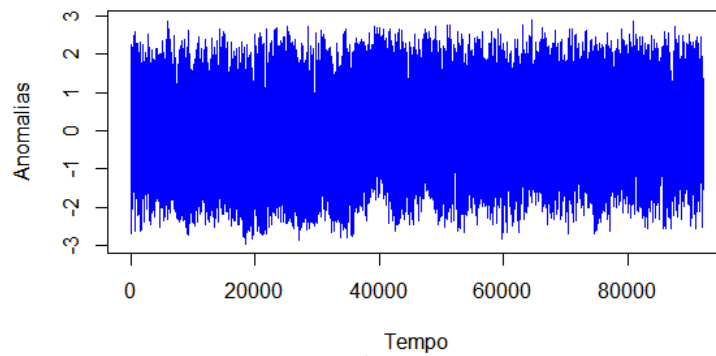
Conforme esperado para a velocidade dos ventos, a base de dados apresenta comportamento de não-estacionariedade. Em séries multifractais, recomenda-se fazer o cálculo das anomalias para retirada do efeito da sazonalidade nos dados (JÚNIOR et al., 2018). Obteve-se a série de anomalias ilustrada na Figura 4, segundo a Equação 2 proposta por Kantelhardt et al. (2006).

$$\phi_{x_i} = \frac{(x_t - \langle x_t \rangle)}{\sigma}, \quad (2)$$

Sigmae, Alfenas, v.8, n,2, p. 238-247, 2019.

64ª Reunião da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS).
18º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agronômica (SEAGRO).

em que x_t corresponde a cada valor observado em determinada hora t , $\langle x_t \rangle$ é a média dos dados da velocidade do vento para t e σ é a raiz quadrada da variância (desvio padrão) em t .

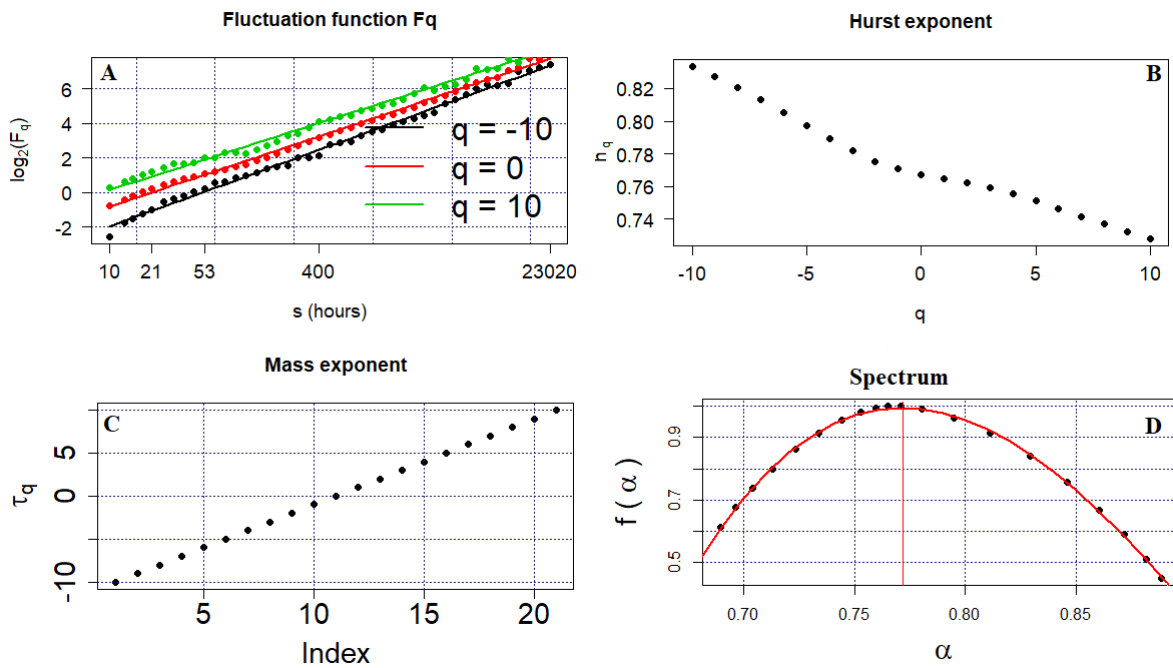


Fonte: próprio autor

Figura 4: Série temporal da anomalia da velocidade do vento de Patos-PB.

Observa-se que a série de anomalias apresenta flutuações de alta frequência em diferentes momentos ao longo dos anos, refletindo características da dinâmica da velocidade média dos ventos. Em alguns meses observa-se maior média dos ventos. Em especial, entre os meses de agosto a novembro, em que há seca na região. Em contrapartida, de dezembro a maio constatou-se menor média nos valores das velocidades devido ao período chuvoso se concentrar nessa época do ano.

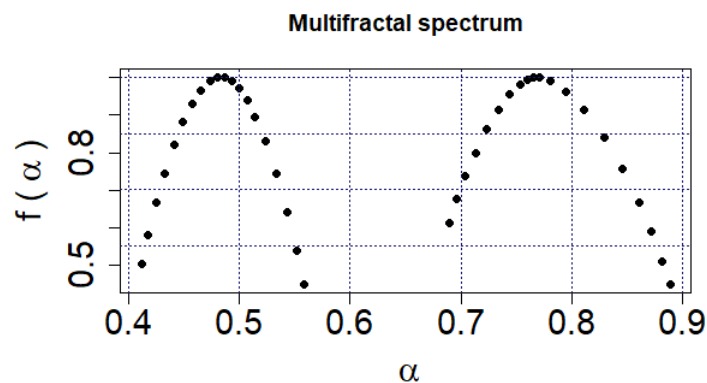
A partir da série de anomalias, foi definido um polinômio de segundo grau para aplicação do MF DFA, com escalas de tempo de 10 a 23020 horas diárias ao longo dos onze anos de observações analisadas. As funções de flutuação, mostradas na Figura 5A, foram ajustadas em escala log-log com $q = -10, 0$ e 10 , indicando o comportamento multifractal da série horária de velocidade do vento, semelhante ao observado no trabalho de Laib et al. (2018). A Figura 5B exibe o gráfico para o expoente de Hurst generalizado, o qual, neste caso, trata-se de uma função decrescente. Isso indica que existem flutuações multifractais ao longo do tempo. A Figura 5C mostra a medida multifractal τ_q e confirma o comportamento não-linear esperado para o processo. A forma côncava para baixo com um ponto de máximo no espectro multifractal da Figura 5D confirma a presença de multifractalidade na série de velocidade do vento. O valor do expoente α encontrado é maior que 0,5, indicando propriedades persistentes para a velocidade do vento.



Fonte: próprio autor

Figura 5: Resultados do MF DFA nas séries de velocidade do vento (em m/s) da estação meteorológica explorada: (a) Funções de flutuação para $q = -10$, $q = 0$, $q = 10$ (b) Expoente de Hurst generalizado para cada q (c) Expoente de Rényi τ_q (d) Espectro multifractal $f(\alpha)$.

Uma comparação entre o espectro multifractal da série de anomalias e da série randomizada encontra-se na Figura 6. É necessário realizar essa comparação para averiguar se a multifractalidade é causada pela função densidade de probabilidade ou pelas diferentes correlações de longo alcance para flutuações. Verifica-se que a largura do espectro multifractal (dada por $\alpha_{max} - \alpha_{min}$) é maior para a série de anomalias em comparação à série randomizada, indicando que ambas correlações de longo alcance e função de probabilidade de valores são causas de multifractalidade do processo.



Fonte: próprio autor

Figura 6: Espectro multifractal $f(\alpha)$ para anomalias calculadas dos dados originais (à direita) e randomizado (à esquerda), respectivamente.

Os parâmetros de complexidade (α , w e r) para as séries de anomalias e para as séries randomizadas são apresentados na Tabela 2. Nota-se que todos os valores para as séries randomizadas decaíram em relação às séries de anomalias. O valor da assimetria da série de anomalias é maior que 1 (assimetria à direita) indicando que as pequenas flutuações contribuem mais à multifractalidade da série.

Tabela 2: Parâmetros Multifractais α_0 , w e r das séries de anomalias (SA) e das séries randomizadas (SR), respectivamente.

| α_0 (SA) | w (SA) | r (SA) | α_0 (SR) | w (SR) | r (SR) |
|-----------------|----------|----------|-----------------|----------|----------|
| 0,7715 | 0,2966 | 1,3329 | 0,4694 | 0,2275 | 1,0393 |

Fonte: próprio autor

Conclusão

Os resultados indicam que a região investigada apresenta velocidade do vento com propriedades persistentes ao longo do tempo. Observa-se que duas causas podem explicar a multifractalidade na base de dados: a função densidade de probabilidade dos valores e as diferentes correlações de longo alcance de grandes e pequenas flutuações.

Embora os resultados dessa investigação tenham sido importantes para o planejamento da instalação de parque eólico na localidade de Patos-PB, recomendam-se análises da topologia da região, da direção e da rajada dos ventos, entre outros fatores que podem influenciar diretamente na produção de energia eólica.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pela concessão dos dados. A Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo suporte. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências Bibliográficas

ABEEOLICA. *Mais de 870 mil Paraibanos terão 'Energia dos Ventos' em 2018 (Correio da Paraíba)*. 2017. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/noticias/brasil-avanca-em-ranking-de-energia-eolica-com-ventos-entre-os-melhores-do-mundo-reuters/>. Acesso em: 30 mar. 2019.

ABEEOLICA. *Brasil avança em ranking de energia eólica com ventos entre os melhores do mundo (Reuters)*. 2018a. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/noticias/mais-de-870-mil-paraibanos-terao-energia-dos-ventos-em-2018correio-da-paraiba/>. Acesso em: 30 mar. 2019.

Sigmae, Alfenas, v.8, n,2, p. 238-247, 2019.

64ª Reunião da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS).
18º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agronômica (SEAGRO).

- ABEEOLICA. *Espanhola Iberdrola investe 1 bilhão de euros em complexo eólico no Brasil (Exame)*. 2018b. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/noticias/espanhola-iberdrola-investe-1-bilhao-de-euros-em-complexo-eolico-no-brasil-exame/>. Acesso em: 30 mar. 2019.
- DUTTA, S.; GHOSH, D.; SAMANTA, S.; DEY, S. Multifractal parameters as an indication of different physiological and pathological states of the human brain. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v.396, p.155-163, 2014.
- GUIGNARD, F.; LOVALLO, M.; LAIB, M.; GOLAY, J.; KANEVSKI, M.; HELBIG, N.; TELESCA, L. Investigating the time dynamics of wind speed in complex terrains by using the Fisher-Shannon method. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v.523, p.611-621, 2019.
- INVESTIMENTOS E NOTÍCIAS. *Geração de energia eólica cresce 17,8% em 2018*. 2018. Disponível em: <http://www.investmentosenoticias.com.br/noticias/negocios/geracao-de-energia-eolica-cresce-17-8-em-2018>. Acesso em: 29 mar. 2019.
- JUNIOR, S.F.A.X.; STOSIC, T., STOSIC, B.; JALE, J.D.S.; XAVIER, E.F.M. A brief multifractal analysis of rainfall dynamics in Piracicaba, São Paulo, Brazil. *Acta Scientiarum. Technology*, Editora da Universidade Estadual de Maringá-EDUEM, v.40, p.1-6, 2018.
- KANTELHARDT, J. W., KOSCIELNY-BUNDE, E., RYBSKI, D., BRAUN, P., BUNDE, A.; HAVLIN, S. Long-term persistence and multifractality of precipitation and river runoff records. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v.111, n.D1, 2006.
- KANTELHARDT, J. W.; ZSCHIEGNER, S. A.; KOSCIELNY-BUNDE, E.; HAVLIN, S., BUNDE, A.; STANLEY, H.E. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v.316, n.1-4, p.87-114, 2002.
- KAVASSERI, R.G.; NAGARAJAN, R. A multifractal description of wind speed records. *Chaos, Solitons & Fractals*, Elsevier, v.24, n.1, p.165-173, 2005.
- LAIB, M.; GOLAY, J.; TELESCA, L.; KANEVSKI, M. Multifractal analysis of the time series of daily means of wind speed in complex regions. *Chaos, Solitons & Fractals*, Elsevier, v.109, p.118-127, 2018.
- LEITE, A.P.; FALCÃO, D.M.; BORGES, C.L. Modelagem de usinas eólicas para estudos de confiabilidade. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática*, SciELO Brasil, v.17, n.2, p.177-188, 2006.
- STOSIC, T.; STOSIC, B.D. Multifractal analysis of human retinal vessels. *IEEE transactions on medical imaging*, v.25, n.8, p.1101-1107, 2006.

Sigmae, Alfenas, v.8, n.2, p. 238-247, 2019.

64^a Reunião da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS).
18^o Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agronômica (SEAGRO).

TELESCA, L.; LOVALLO, M. Analysis of the time dynamics in wind records by means of multifractal detrended fluctuation analysis and the Fisher-Shannon information plane. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, IOP Publishing, v.2011, n.07, p.1-31, 2011.

YUAN, Y.; ZHUANG, X.T.; JIN, X. Measuring multifractality of stock price fluctuation using multifractal detrended fluctuation analysis. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v.388, n.11, p.2189-2197, 2009.

R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2012. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

Sigmae, Alfenas, v.8, n,2, p. 238-247, 2019.

64^a Reunião da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS).
18^o Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agronômica (SEAGRO).