

Aplicação do método Detrended Fluctuation Analysis (DFA) em correlações de curto ou longo alcance em séries temporais de ventos do município de Apodi-RN

Hugo Vitor F. Guedes^{1†}, Mikael Jakson S. Gomes², Álison P. da Silva¹, Jéllisson S. da Silva³

¹Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN).

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Rio Grande do Norte (IFRN) - Campus João Câmara - RN.

Resumo: *Esse artigo visa verificar as correlações de curto ou longo alcance persistente e antipersistente em séries temporais de ventos do município Apodi localizado no Estado do Rio Grande do Norte. Para realizar o estudo da correlação do vento aplica-se um método estatístico denominado Detrended Fluctuation Analysis (DFA). As energias renováveis, em especial a energia eólica, vêm crescendo muito ao longo do tempo como uma das principais fontes de energia, utilizada em diversos países para o abastecimento energético de residências, fábricas, empresas etc. Por ser limpa, natural e causar poucos danos ambientais como outras fontes energéticas poluentes e sujas a mesma tem despertado muito interesse da comunidade científica. Neste contexto se faz necessário desenvolver tecnologias capazes de avaliar o potencial eólico. Pode-se fazer uso de métodos estatísticos, a fim de analisar séries temporais de velocidade de ventos, objetivando quantificar, prever e prever as velocidades do vento em uma determinada região. Como abordagem metodológica, foram realizadas pesquisas bibliográficas em trabalhos científicos relacionadas com a temática, adotou-se três etapas para a aplicação do DFA, na primeira etapa foi feita a coleta, tabulação e correções dos dados utilizando os softwares, The R, Geogebra, Excel e outros após isso foi realizada a aplicação do DFA. Após os resultados observou-se que a velocidade de vento não há correlação antipersistente, nem do tipo decorrelacionada (ou ruído branco), há apenas correlações persistentes, o que significa que velocidades altas de vento tem maior probabilidade de serem seguidas por velocidades altas de vento.*

Palavras-chave: *DFA; eólica; estatística; ventos; série temporal.*

Application of the Detrended Fluctuation Analysis (DFA) method in short or long-range correlations in wind time series of Apodi-RN municipality

Abstract: *This article aims to investigate short and long-range persistent and anti-persistent correlations in wind time series data from the municipality of Apodi in the state of Rio Grande do Norte, Brazil. The study employs a statistical method known as Detrended Fluctuation Analysis (DFA) to analyze wind correlations. Renewable energies, particularly wind energy, have been steadily growing as a major energy source used in various countries to power residences, factories, and businesses. Due to its clean, natural attributes and minimal environmental impact compared to other polluting energy sources, wind energy has garnered significant interest from the scientific community. In this context, there is a need to develop technologies capable of assessing wind potential. Statistical methods are employed to analyze wind speed time series, with the objective of quantifying, predicting, and forecasting wind speeds in a specific region. The methodological approach includes a literature review of relevant scientific works, and the DFA application involves three stages: data collection, tabulation, and corrections using software such as R, Geogebra, Excel, among others. The results indicate that wind speed exhibits no anti-persistent correlation or uncorrelated behavior (white noise), but rather persistent correlations, suggesting that high wind speeds are more likely to be followed by high wind speeds.*

Keywords: *DFA; Wind; Statistics; Winds; Time Series.*

Introdução

A importância das energias renováveis vem crescendo constantemente ao longo do tempo como uma das principais fontes de energia, utilizada em diversos países para o abastecimento energético de residências, fábricas, empresas etc. (KERDINA, 2018).

Ainda há muito que se estudar dessa rica fonte de energia gerada pelo vento. Para os países que possuem hidrelétricas como a principal fonte geradora de energia, o suprimento energético está basicamente concentrado na geração de energia por hidrelétricas, que sofrem instabilidades nos períodos de estiagem, como o Brasil, por exemplo, a energia eólica é muito importante, porque ela não consome água, é renovável, limpa e por causar pouquíssimo danos ambientais como outras fontes energéticas poluentes e sujas (GONÇALVES, 2016).

Neste sentido, a energia eólica destaca-se como uma das mais promissoras fontes na geração de eletricidade, sendo renovável e cada vez mais competitiva. Dessa forma, o potencial existente no Brasil pode consolidar a matriz elétrica brasileira como sendo umas das mais renováveis do mundo: Além de ser potencialmente um dos vetores para o desenvolvimento regional quando se observa o mapa eólico do Brasil, a Região Nordeste tem a maior viabilidade técnica em recurso eólico do país, pois mais da metade do potencial se encontra em tal região, e o Rio Grande do Norte se destaca entre os estados nordestinos (OLIVEIRA NETO; APOLINÁRIO, 2015).

O vento constitui uma imensa fonte de energia natural e renovável, a partir da qual é possível gerar grande quantidade de energia elétrica (BEZERRA 2017, p6), e o Rio Grande do Norte é privilegiado por ter grande parte do território litoral recebendo ventos regulares. Sendo que 143 GW de potencial que o Brasil possui mais da metade está no Nordeste, são 75 GW (OLIVEIRA NETO; APOLINÁRIO, 2015).

No contexto dos objetivos desta pesquisa, o presente trabalho visa investigar as correlações presentes entre as variáveis de séries temporais de ventos, focando especificamente na análise persistente/antipersistente em correlações de curto ou longo alcance. Este estudo concentra-se nas séries temporais de ventos coletadas no município de Apodi, localizado no Estado do Rio Grande do Norte. Para realizar o estudo da correlação do vento aplicamos um método estatístico denominado Detrended Fluctuation Analysis (DFA)[C.-K. PENG; S. V.BULDYREV; A. L.GOLDBERGER; S. HAVLIN; F. SCIORTINO; M. SIMONS e H. E. STANLEY, 1992], desenvolvido por Peng em 1994. Isto é, análise da flutuação sem tendências. Bem como construir modelos de regressão linear para análise de previsão e estudar as correlações de longo alcance das séries temporais da velocidade do vento no município de Apodi RN.

O DFA faz análises de séries temporais não estacionárias e estacionárias, e através do expoente de Hurst é possível analisar se existe correlação de longo alcance ou se não existe correlação. Existindo a correlação, é possível observar se a correlação é positiva, negativa, persistente ou antipersistente, de curto alcance ou de longo alcance. Logo, o conjunto de observações ordenadas desses fenômenos são denominadas de séries temporais, e muitas dessas séries temporais são não estacionárias, por que seus momentos estatísticos variam segundo a janela temporal escolhida na série (N.F. LIMA 2018, p57).

Referencial Teórico

Energia eólica

Atualmente, a maior importância em aproveitamento da energia eólica tem sido direcionada ao uso da energia renovável e de fonte considerada limpa, à produção de eletricidade, sendo apontada como a mais promissora em curto prazo, considerando aspectos de segurança energética, custo socioambiental e viabilidade econômica (MARTINHO, 2016). Considerando tais vantagens, várias instituições se empenham no mapeamento eólico do Brasil e algumas regiões são consideradas com melhores potenciais de vento, como as regiões Norte e Nordeste, sendo esta última, uma das pioneiras na instalação de energia eólica para aproveitamento na geração de energia elétrica, considerando o argumento de pertencer à costa litorânea, onde se observam fortes e estáveis ventos durante todo o ano (DOS ANJOS, 2013).

O crescimento da demanda energética mundial em razão da melhoria dos padrões de vida nos países em desenvolvimento, traz a preocupação com alguns aspectos essenciais para a política e planejamento energético de todas as economias emergentes. Dentre estes, pode-se citar a segurança no suprimento de energia necessária para o desenvolvimento social e econômico de um país e os custos ambientais para atender a esse aumento no consumo de energia. Atualmente o suprimento está associado às perspectivas do possível esgotamento das reservas de petróleo nas próximas décadas (MARTINS, 2008).

Estatística de Hurst

Pode-se fazer uso de métodos estatísticos, a fim de analisar séries temporais de velocidade de ventos, objetivando quantificar, prever e prever as velocidades do vento em uma determinada região. Um dos métodos utilizados é a estatística de Hurst. Harold E. Hurst (1880 - 1978) foi um hidrólogo inglês que passou parte de sua vida dedicando-se a descrição dos problemas relacionados aos reservatórios de água do rio Nilo. (HURST, 1951) Hurst percebeu que as vazões e enchentes do rio Nilo caracterizavam-se como um processo de natureza estocástica, foi o pioneiro na criação do método para examinar a persistência em séries temporais de longo alcance e, fundamentado no conceito de passeio aleatório, a estatística R/S, também conhecida como *rescaled range ou range over standard deviation* (alcance reescalado ou alcance sobre desvio padrão), foi empregada pelo autor na investigação das inundações no rio Nilo. Com objetivo de descrever os problemas de dimensionamento das represas, um método capaz de prever essas situações foi proposto por Hurst (1951), a análise estatística, descrita em detalhes no livro Long-Term Storage: An Experimental Study. (HURST, H.E.; BLACK, R.P.; SIMAIKA, Y.M, 1965).

A estatística R/S consistia na mensuração dos volumes máximos e mínimos do reservatório (amplitude) e no cálculo do desvio-padrão dos fluxos de água em um período de tempo τ , de modo que R/S seria a razão entre a amplitude ($R\tau$) e o desvio padrão ($S\tau$) das vazões de água, sendo que o referido valor é adimensional. Hurst, ao realizar essa estatística em diversos períodos de tempo, através desse modelo, constatou que a estatística R/S apresentava uma função de relacionamento com o número de observações do cálculo, inclusive para outros fenômenos naturais (HURST, E, 1951), (C.-K. PENG, S. V. BULDYREV, A. L. GOLDBERGER, S. HAVLIN, F. SCIORTINO, M. SIMONS & H. E. STANLEY, 1994), (BORIS PODOBNIK, H. EUGENE STANLEY, 2008).

A análise de Flutuação Detrendada (DFA) e a Análise de Intervalo Redimensionado (R/S) são os métodos de escalonamento mais amplamente utilizados para estimar os expoentes de correlação de lei de potência em sinais aleatórios. A técnica R/S envolve os seguintes passos: a série temporal estocástica $y(i)$, onde ($i=1,2,\dots,N_{max}$), é particionada em caixas de tamanho igual n . As funções:

$$X_i = \sum_{j=kn+1}^i [y(j) - \langle y \rangle] \quad (1)$$

Em seguida para cada segmento calcula-se a diferença entre máximos e mínimos,

$$R_v(s) = \max(x_{vk}) - \min(x_{vk}), k = (v-1)s + 1, \dots, vs \quad (2)$$

Em que o desvio padrão é dado por:

$$S_v(s) = \sqrt{\square} \quad (3)$$

A razão adimensional R/S proporciona a capacidade de comparar o reescalamento de séries temporais associadas a uma ampla variedade de fenômenos naturais. Hurst, por meio de suas descobertas, evidenciou que o reescalamento de várias séries temporais distintas pode ser adequadamente descrito por meio de uma lei de potência, conforme expresso na seguinte relação empírica apresentada por HURST (1965):

$$\frac{R}{S} = k N^H \quad (4)$$

Em que, $N = \tau$ é o intervalo de tempo para as observações, H é o Exponente de Hurst calculado a partir do método R/S e k é uma constante. Os valores da escala de expoentes de Hurst estão entre 0 e 1 (HENRICE JÚNIOR, 2017).

A função de flutuação de Hurst é dada pela expressão,

$$F_{\frac{R}{S}}(s) = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^{N_s} \frac{R_v(s)}{S_v(s)} s^H, \text{ para } s > 1 \quad (5)$$

A relação entre o expoente de Hurst (H), o expoente de correlação (γ) e o coeficiente (β) da análise espectral pode ser expressa pela seguinte equação:

$$2H = 1 + \beta = 2 - \gamma \quad (6)$$

O expoente de Hurst classifica séries temporais em três categorias distintas: ($H = 0,5$) representa uma distribuição praticamente indistinguível do ruído a função de autocorrelação diminui exponencialmente; para ($0 < H < 0,5$), a série é considerada anti-persistente, indicando uma dinâmica não linear mais pronunciada e uma natureza mais caótica, com forte tendência a retornar ao estado de equilíbrio; enquanto para ($0,5 < H < 1,0$), a série é caracterizada como persistente, sugerindo dinâmica não linear e uma natureza menos caótica. Pois existe uma probabilidade superior a cinquenta por cento de que valores elevados (ou baixos) sejam seguidos por valores também elevados (ou baixos). Essas categorias refletem diferentes comportamentos dinâmicos associados aos valores do expoente de Hurst em uma série temporal. A função de autocorrelação $A(\tau)$ diminui seguindo uma lei de potência $A(\tau) = \tau^{-2H}$; para o valor $H = 1$ representa ruído um ruído tipo $\frac{1}{f}$ o espectro de potências $s(f)$ segue uma lei de potência $s(f) = f^{-\beta}$, $\beta = 2H - 1 = 1$; Para valores de ($H > 1$), as correlações estão presentes, mas não diminuem de acordo com uma lei de potências. No caso específico de ($H = 1,5$), isso indica a presença de um ruído Browniano, que resulta da integração do ruído branco (um tipo de sinal estocástico que possui características específicas).

Detrended Fluctuation Analysis (DFA)

O método *Detrended Fluctuation Analysis* (DFA) foi introduzido por Peng et al. com o propósito de quantificar correlações, especialmente em séries temporais não estacionárias. Este método tem sido amplamente aplicado, Segundo Dos anjos (2013, p. 42) em análises de sequências genéticas de DNA, em fisiologia, climatologia, geofísica, meteorologia e em séries temporais financeiras. Ele proporciona a capacidade de detectar autossimilaridade em séries não estacionárias. A vantagem distintiva desse método em comparação com abordagens convencionais é a sua habilidade em evitar detecções falsas de correlações de longo alcance, as quais podem ser artefatos decorrentes de tendências incorporadas no sinal.

Na Análise de Hurst R/S, uma caminhada aleatória é inicialmente criada, e em seguida, uma operação de retificação é realizada. Nessa operação, um polinômio, originalmente linear e frequentemente local, é ajustado à caminhada dentro de cada janela. Essa abordagem visa identificar a tendência presente na série, a qual é posteriormente removida. Essencialmente, a detecção e remoção da tendência ajudam a revelar as características estatísticas subjacentes associadas a escalas diferentes na série temporal (DOS ANJOS 2013; ALESSIO, 2002).

Por outro lado, na técnica de *Detrended Fluctuation Analysis* (DFA), a função R/S é calculada para caixas de tamanho igual (n). Durante esse processo, a análise é iterativa, envolvendo diferentes amplitudes de caixa (n). A relação entre a média da função R/S e (n) revela uma relação que, na presença de escalonamento, segue uma lei de potências. No DFA, a série é dividida em caixas de tamanho igual, e em cada caixa, uma função polinomial $y_{plot}(i)$ é calculada para interpolar a sequência. Esta curva interpoladora $y_{plot}(i)$ representa a tendência local em cada caixa, e o valor médio da função é usado na análise (ALESSIO, 2002).

$$DFA = \sqrt{\square} \quad (7)$$

A média é calculada sobre todas as caixas de tamanho igual. Repetindo o cálculo com caixas de diferentes tamanhos, uma relação como $DFA \propto n^H$ é obtida para processos correlacionados de longa memória.

Ambos os métodos, R/S e DFA, compartilham a ideia de detectar e remover tendências para revelar características fundamentais relacionadas à dependência de longo alcance e escalonamento em séries temporais não estacionárias.

O algoritmo DFA é dado a seguir por (MATSOUKAS, 2000; PENG, 1994; DOS ANJOS, 2013):

- I. Inicialmente, a série temporal original $x(t)$ onde $t = 1, \dots, N$, é deslocada pela média $\langle x \rangle$ e, em seguida, integrada, resultando em:

$$y(n) = \sum_{t=1}^n [x(t) - \langle x \rangle] \quad (8)$$

$$n = 1, \dots, N, \text{ onde } \langle x \rangle = \frac{\sum_{t=1}^N x(t)}{N} \text{ representa a média } x(t)$$

- II. A série integrada $y(n)$ é subdividida em $N_v \int \left(\frac{N}{v} \right)$ segmentos não sobrepostos, cada um com comprimento v . Em cada segmento $s = 1, \dots, N_s$, realiza-se uma estimativa da tendência local, $y_{v,s}(n)$, por meio de um ajuste polinomial, geralmente linear. Essa estimativa é então subtraída da série original $x(n)$, resultando na transformação da série integrada $y(n)$ em uma série livre de tendências.
- III. A variância desprovida de tendência é calculada da seguinte maneira:

$$F_{DFA}^2 = \frac{1}{vN} \sum_{s=1}^{N_v} \sum_{n=(s-1)v+1}^{sv} [y(n) - y_{v,s}(n)]^2 \quad (9)$$

- IV. Repita-se processo (i, ii, iii) para segmentos de diversos comprimentos, estabelecendo a relação entre a função de flutuação $F_{DFA}(v)$ e o tamanho do segmento v . Se a série original $x(n)$ exibe correlações de longo alcance e a função $F_{DFA}(v)$ aumenta com v , seguindo uma lei de potência,

$$F_{DFA}(v) v^\alpha \quad (10)$$

O expoente de autossimilaridade α é também caracterizado como o coeficiente angular da reta resultante da regressão linear do gráfico $\log \log F_{DFA}(v)$ em função de $\log \log v$ conforme expresso por:

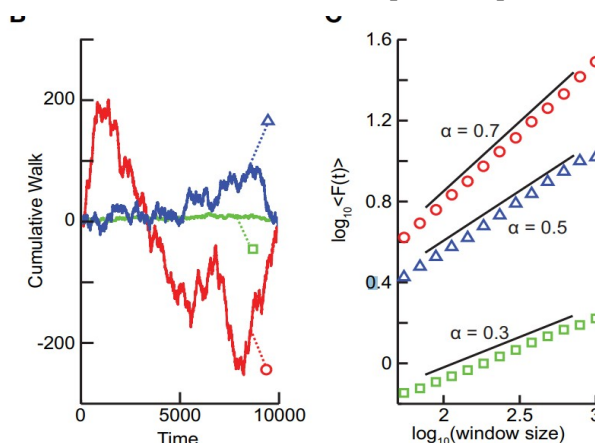
$$\alpha = \frac{\Delta \log \log F_{DFA}(v)}{\Delta \log \log (v)} \quad (11)$$

O expoente de autossimilaridade α , que caracteriza a autocorrelação da série analisada, pode ser interpretado da seguinte forma (Hardstone et al, 2012):

- $\alpha = 0,5$ para ruído branco (série não correlacionada), indicando uma caminhada aleatória na série;
- $(0,5 < \alpha < 1)$ indica a presença de correlações de longo alcance persistentes na série original;
- $i(0 < \alpha < 0,5)$ sugere que a série original exibe correlações de longo alcance antipersistentes;
- $(\alpha = 1)$ sugere que a série possui características de ruído do tipo $(1/f)$;
- $(\alpha > 1)$ indica que as correlações ainda existem, mas não seguem uma lei de potência;
- $(\alpha > 1,5)$ aponta para um ruído Browniano, que é a integração do ruído branco.

O expoente α pode ser interpretado como o parâmetro que reflete a suavidade da série temporal original; em outras palavras, um valor maior de α está associado a uma série analisada mais suave, como por exemplo a figura 1 seguir.

Figura 1: Ilustração de aplicação do método DFA em séries temporais experimentais.



Fonte: (Hardstone et al, 2012).

A Figura 1 exibe exemplos de séries temporais experimentais originais, representadas no gráfico em $\log\log F(t)$ versus $\log\log(t)$, onde o expoente de autossimilaridade α é destacado para indicar a correlação dessas séries. Os marcadores identificam diferentes comportamentos: o círculo vermelho representa uma série positivamente correlacionada, o triângulo azul caracteriza uma série não correlacionada, exibindo uma caminhada aleatória, e o quadrado verde representa uma série anticorrelacionada, evidenciando flutuações menores ao longo do tempo (DOS ANJOS, 2013).

Metodologia

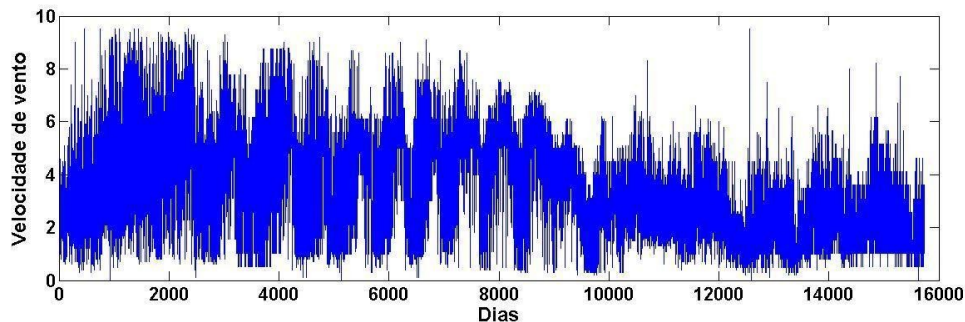
Foram necessários 3 momentos para verificar as correlações de curto ou longo alcance persistente/antipersistente em séries temporais de ventos no referido município. Num primeiro momento foram realizadas pesquisas bibliográficas em trabalhos científicos relacionadas com a temática abordada, onde vários autores utilizaram o DFA como ferramenta afim de analisar e prever fenômenos da natureza (ANJOS, et al, 2015; PENG et al, 1992; LIMA, et al, 2018; HUST, et al, 1965; NETO, et al, 2015; GONÇALVES, 2016). Pelo fato de ser uma pesquisa quantitativa, num segundo momento foram realizadas as coletas de dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia INMET no endereço <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Devido a quantidade enorme de dados coletados desde o período de 01 de janeiro de 1990 até 30 de maio de 2017, existe uma grande dificuldade de observar o comportamento do vento, pois apresentam comportamento aleatório e não estacionário (Lima et al 2018), por conseguinte torna-se uma tarefa complicada de ser realizada. Neste contexto se fez necessário o uso de métodos estáticos e ferramentas computacionais como: histograma, *box plot* e regressão linear, que foram desenvolvidos em *softwares* gratuitos como: *Geogebra classic 5*, *Scilab 6.0*, *The R*, *Microsoft Office Excel 365*.

Após a coleta dos dados e a correção dos dados, aplica-se o DFA afim de estudar as autocorrelações das velocidades de vento no município de Apodi, localizado no estado do Rio Grande do Norte, Brasil. Foi utilizado o método estatístico: (DFA) *Detrende Flutuation Analysis* (Peng et al, 1992).

Resultados e discussões

Iniciamos os resultados e discussões apresentando o Gráfico a seguir de velocidade do vento da cidade de Apodi RN.

Figura 2: Gráfico de velocidade do vento da cidade de Apodi no período de 01 janeiro de 1990 até 30 de maio de 2017.



Fonte: Autores.

Utilizando esses dados chega-se à uma nova série temporal através da Equação (12):

$$x(i) = \frac{\log(z_i + \Delta_i) - \log(z_i)}{\sigma} \quad (12)$$

Em que z_i representa as observações diárias com $i = 1, \dots, N$, onde N indica o número de observações diárias Δ_i representa o intervalo das observações, neste caso $\Delta_i = 1$ dia enquanto σ é o desvio padrão dos valores absolutos da série de retorno dos logaritmos.

A partir da série temporal $x(i)$ onde $i = 1, 2, \dots, N$, onde N é comprimento da série temporal, integra-se $x(i)$ para se obter $y(k)$, como na Equação (13):

$$y(k) = \sum_{\square} x(y) - \langle x \rangle \quad (13)$$

Onde $\langle x \rangle$ é a média do sinal $x(i)$, em seguida divide-se o sinal integrado $y(k)$ em caixas de mesmo tamanho n justapostos, então ajustamos $y(k)$ por meio de uma função polinomial de grau 1 (o que nesse caso ajuste foi feito por uma função polinomial de grau 1, e uma função polinomial de grau 2 função quadrática (PENG, BULDYREV, HAVLÍN, SIMONS, STANLEY & GOLDBERGER, 1994), (GVOZDANOVIC, PODOBNIK, WANG & STANLEY, 2012), que representa a tendência na caixa específica; continuando, o sinal $y(k)$ é subtraído de $y_n(k)$ que representa a tendência local em cada caixa. Para quantificar as flutuações foi utilizada a função de flutuação na equação (3) em todas as caixas para cada n

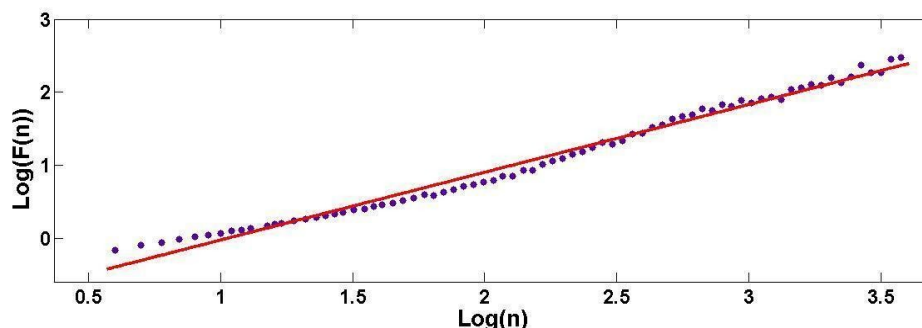
$$F(n) = \sqrt{\square} \quad (14)$$

Quando há lei de potência neste cálculo iterativo, então $F(n)$ segue uma lei de potência do tipo $F(n) \propto n^\alpha$ em que $\alpha \approx H$ (expoente de Hurst) (DOS ANJOS, DA SILVA, STOSIC & STOSIC 2015). A persistência nestas séries temporais pode ser caracterizada pela função de autocorrelação $C(t)$ em que t é o tempo entre as observações; esta função decai como $C(t) \propto t^{-\gamma}$ (lei de potência). O expoente γ está relacionado com o expoente α do seguinte modo $\gamma = 2 - 2\alpha$.

Para obter o expoente α foi calculado o coeficiente angular da reta $\log(F(n))$ versus $\log(n)$. Assim se $0 < \alpha < 0,5$ (auto afinidade) as auto correlações da série original são antipersistentes; se $0,5 < \alpha \leq 1$ as auto correlações são persistentes, se $\alpha = 0,5$ a série não apresenta correlação (ruído branco) e se $\alpha = 1$ as correlações existem mas não apresentam lei de potência (DOS ANJOS, DA SILVA, STOSIC & STOSIC, 2015), (LI, NISHIMURA & MEN, 2016).

O método estatístico DFA foi utilizado na avaliação de dados diários de velocidade de vento na cidade de Apodí, Rio Grande do Norte. A figura (2) mostra a aplicação do método DFA nos dados de Apodí. Neste caso foi utilizada uma regressão linear

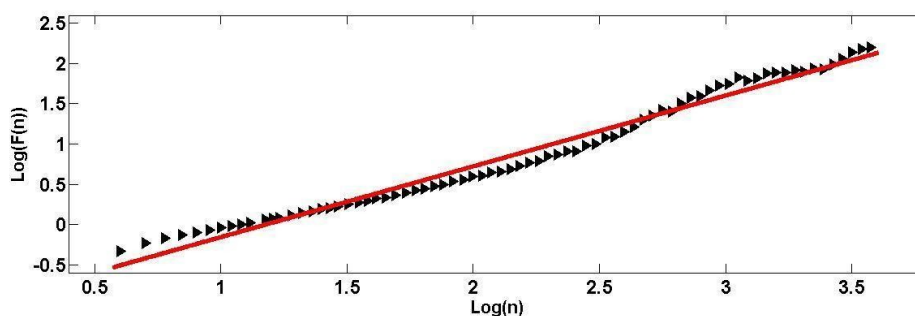
Figura 3: Regressão linear da velocidade de vento de Apodí.



Fonte: Autores.

Na Figura (3) as bolinas azuis representam as flutuações ($\text{Log } f(n)$) e a linha vermelha representa a tendência de tais flutuações. Retirando das caixas justapostas da série integrada a tendência linear (figura (3)). Na aplicação do DFA, retirando a tendência linear, o valor de α foi igual a $0,9294 \pm 0,96$ ($\alpha = 0,9294 \pm 0,96$), o que indica que ventos com velocidades altas tem maior probabilidade de ser seguido por ventos com velocidades altas, enquanto ventos com velocidades baixas tem maior probabilidade de serem seguidos por ventos com velocidades baixas (LIMA, FREIRE, SANTOS & ALBUQUERQUE, 2017). À medida que o valor se aproxima de 1 a autocorrelação parcial se torna mais forte, nesse caso a auto correlação está muito próxima de 1. O que indica uma autocorrelação forte.

Figura 4: Regressão quadrática da velocidade de vento de Apodí.



Fonte: Autores.

Na figura (3) temos a regressão quadrática das velocidades de vento da cidade de Apodí, na qual os triângulos pretos representam as flutuações e a reta vermelha representa a tendência linear. Nesse caso foi retirada a regressão quadrática da série integrada foi obtida a lei de potência $F(n) \propto n^\alpha$ ($\alpha = 0,8803 \pm 1,041$) o que mostra uma correlação persistente, que assim como na figura (2) significa que velocidades altas de vento tem maior probabilidade de serem seguidas por velocidades altas de vento. Embora não exclua a possibilidade de velocidades altas serem seguidas por velocidades baixas, mas que há uma maior chance de serem seguidas por velocidades altas de vento.

O estudo da velocidade do vento é crucial para o desenvolvimento eficiente de parques eólicos. Ele determina o potencial eólico de uma região, influencia a eficiência na geração de energia e orienta o planejamento estratégico e a localização dos parques. A variabilidade do vento impacta diretamente na viabilidade econômica do projeto, afetando projeções de retorno do investimento. Além disso, o conhecimento

das condições do vento é essencial para operação, manutenção eficaz e contribuição sustentável para a matriz energética.

Conclusão

Ao analisarmos as velocidades de vento da cidade de Apodi, observamos que não há correlação antipersistente, nem descorrelacionada (ou ruído branco), existem apenas correlações persistentes, pois, o valor do expoente α é maior que 0,5 ($0,5 < \alpha < 1$). O que significa que velocidades altas de vento tem maior probabilidade de serem seguidas por velocidades altas de vento.

A comparação entre a regressão linear e a regressão quadrática mostrou uma diferença muito pequena. Na regressão linear foi obtido o valor de $\alpha = 0,924 \pm 0,96$, enquanto na regressão quadrática foi obtido o valor de $\alpha = 0,8803 \pm 1,041$. Como perspectivas para as etapas posteriores da presente pesquisa vislumbra-se a possibilidade de ampliar o número de variáveis climatológicas avaliadas, contemplando por exemplo, a umidade e temperatura, a fim de proporcionar a possibilidade de avaliar a influência mútua destas grandezas na velocidade do vento.

Portanto, esse resultado é crucial para a viabilidade da implantação de parques eólicos, pois fornece uma análise fundamental do comportamento da velocidade média diária do vento.

Referencias

Bezerra, F. H. R., Takeya, M. K., Sousa, M. O. L. 2007. **Coseismic reactivation of the Samambaia fault, Brazil**. *Tectonophysics*, 430, 27—39.

C.- K. Peng, S. V. Buldyrev, S. Havlin, M. Simons, H. E. Stanley, A. L. Goldberger, Mozaic organization of DNA nucleotides, **Physical Review E** 49, 1685 -1689, 1994.

criminalidade em Salvador (1980-2000). Dissertação de Mestrado, UNIFACS Universidade de Salvador, 2004.

DOS ANJOS, P. S. *et al.* Long-term correlations and cross-correlations in wind speed and solar radiation temporal series from Fernando de Noronha Island, Brazil. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 424, p. 90-96, 2015.

ANJOS, Priscilla Sales dos. **CORRELAÇÕES DE LONGO ALCANCE EM SÉRIES TEMPORAIS DA VELOCIDADE DO VENTO E RADIAÇÃO SOLAR EM FERNANDO DE NORONHA, BRASIL**. 2013. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Biometria e Estatística Aplicada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2013.

GONÇALVES, Vanessa Lucas. **A bioeletricidade da biomassa residual da cana-de-açúcar e a mudança de paradigma tecnológico no segmento de geração de energia elétrica no brasil**. 2016. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Desenvolvimento Econômico, Setor de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: < <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/44168> >. Acesso em: 23 jan. 2024.

Hardstone et al. Detrended fluctuation analysis: a scale-free view on neuronal oscillations, **Frontiers in Physiology**, November 2012 | Volume 3 | Article 450.

HENRICE JÚNIOR, E. **Proposta de utilização do expoente de Hurst da detecção de transientes causados pela fonte externa de nêutrons em reatores ADS**. 2017.

HURST, H. E.; BLACK, R. P.; SIMAIKA, Y. M. Long-Term Storage: An Experimental Study. **Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)**, v. 129, n. 4, p. 591-593, 1966.

- HURST, Harold Edwin. Long-term storage capacity of reservoirs. **Transactions of the American society of civil engineers**, v. 116, n. 1, p. 770-799, 1951.
- KERDNA PRODUÇÃO EDITORIAL (Brasil) (Ed.). **Energia Eólica e Solar**. 2018. Disponível em: < <http://fontes-de-energia.info/energia-eolica-e-solar.html> >. Acesso em: 23 jan. 2024.
- LI, Daye; NISHIMURA, Yusaku; MEN, Ming. Why the long-term auto-correlation has not been eliminated by arbitragers: Evidences from NYMEX. **Energy Economics**, v. 59, p. 167-178, 2016.
- LIMA, N. F, FREIRE M. A. C, SANTOS J.J & ALBUQUERQUE R. R. C. **Correlação de longo alcance temporal da velocidade do vento nos municípios de Ceará-Mirim e Natal no Rio Grande do Norte**; Revisa Holos. 2017. Disponível em www.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/download/5491/. Acesso em 24 de janeiro de 2018.
- MARTINHO, F. M. **Energia Eólica: Estudos e Reflexões sobre a viabilidade do potencial dessa matriz energética no Brasil**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, Ano 1. Vol. 10 pp. 25-38. ISSN. 2448-0959.
- MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, p. 1304.1-1304.13, 2008.
- MATSOUKAS, A.; ISLAM, S.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. Detrended fluctuation analysis of rainfall and streamfall time series, **Journal of geophysical research** **105**, 105 - 129, 2000.
- OLIVEIRA NETO, C. R. de; APOLINÁRIO, V. **Expansão da energia eólica no brasil, nordeste e rio grande do norte: desafios e oportunidades para o desenvolvimento**. In: XX SEMINÁRIO DE PESQUISA DO CCSA, 20., 2015, Natal. Anais... Natal: Não Sei A Editora, 2015. p. 1 - 15. Disponível em: < <https://seminario2016.ccsa.ufrn.br/assets//upload/papers/eae5bc76c4b8273c4d926a51a23e245f.pdf> >. Acesso em: 23 jan. 2024.
- PENA, R. F. A. **Fontes renováveis de energia**; Brasil Escola. Disponível em <http://brasilecola.uol.com.br/geografia/fontes-renovaveis-energia.html> . Acesso em 24 de janeiro de 2024.
- PENG, C. K. *et. al.* **Long-range correlations in nucleotide sequences**, Nature, v.356, n. 6365, p. 168-170, 1992.
- SILVA, José Apolinário da. **Transformações urbana, socioeconômica e da Study**. London: Constable, 1965.