

## **Análise de Correlação de Longo Alcance em Séries Temporais de Vento para fins de Energia Eólica**

Vanessa Cristina Oliveira de Souza<sup>1</sup>  
Arcilan Trevenzoli Assireu<sup>1</sup>  
Reinaldo Rosa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI  
Caixa Postal: 50 - CEP: 37500-903 - Itajubá - MG, Brasil  
{vanessasouza, arcilan}@unifei.edu.br

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
reinaldo@lac.inpe.br

**Abstract.** Wind energy is one of the renewable energy sources more widely disseminated and used. Despite its great potential, Brazil bit exploits this alternative energy source. To verify the feasibility of installing wind farms, was applied Destrended Fluctuation Analysis (DFA) in the time series of intensity, direction and increment of the wind direction. The advantage of the DFA's method is that allows eliminate trends of different orders and detect trends with polynomial correlations that sometimes mask the nature of the correlations. The aim of this study was investigate the existence of a relationship between the spatial location and the value of DFA for time series of speed and wind direction on ten wind sites, located in São Paulo, Mato Grosso and Goiás. Correlation analyzes between the values of DFA and elevation and latitude of the studied stations was also performed. The results indicated that the series exhibit persistence, both in direction and speed of winds, which favors the installation of wind farms in the locations studied. Furthermore, a negative correlation was detected between the elevation of the station and the DFA absolute wind direction.

**Palavras-chave:** Wind energy, DFA, renewable energy

### **1. Introdução**

O Brasil possui um alto potencial eólico ainda pouco explorado, exceto por algumas iniciativas isoladas. Segundo o Balanço Energético Nacional de 2013, apenas 0.9% da potência gerada atualmente no país advém da energia eólica (Brasil, 2013). No entanto, o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, elaborado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), mostra um potencial bruto de 143,5 GW, o que torna a energia eólica uma alternativa complementar importante à fonte hidrelétrica, predominante no sistema brasileiro.

O vento é caracterizado por dois parâmetros : direção e intensidade. A direção exprime a posição do horizonte aparente do observador a partir da qual o vento parece provir e é expressa em termos de azimute (0 a 360°). A intensidade do vento (expressa normalmente em metros por segundo) caracteriza-se por intensas oscilações cuja rapidez e amplitude estão relacionadas com o estado de agitação do ar. Esta agitação denuncia a passagem, pelo local de observação, de turbilhões de diferentes tamanhos (Varejão-Silva, 2001).

A instalação de um parque eólico não é tarefa simples. As características operativas da usina eólica são fortemente dependentes do regime local. No entanto, o vento observado em um determinado local varia continuamente em função do tempo e da estação do ano, da altitude, da topografia do terreno, da condição meteorológica, entre outros (Olaofe e Folly, 2013).

Devido a essa natureza intermitente, vários modelos estocásticos de distribuição de velocidade do vento têm sido propostos em todo o mundo para a descrição da variação do vento para um determinado local. Estes incluem as distribuições Weibull, Rayleigh, Gamma, Lognormal, Burr e distribuição de Gauss (Olaofe e Folly, 2013). A correlação temporal indica

persistência no regime de ventos, imprescindível para a implantação de um parque eólico, por exemplo.

A principal limitação dos métodos acima citados é o fato deles serem susceptíveis aos efeitos de não-estacionaridade, como as tendências, comuns a dados ambientais. Segundo Magnago et al. (2010), pode-se definir uma tendência como qualquer componente de frequência com um período maior do que o comprimento da própria série. Consequentemente, a presença de uma tendência em uma série temporal faz com que os dados se tornem não estacionários. Além disso, os métodos citados não são capazes de detectar mudanças no regime dos ventos (multifractalidade). Em função dessas limitações, a análise de flutuação destendenciada (DFA) vem sendo aplicada em séries temporais de vento.

O objetivo desse trabalho é investigar a existência ou não de uma relação entre a localização espacial e o valor de DFA para séries de velocidade e direção do vento de dez sítios eólicos, localizados em São Paulo, Mato Grosso e Goiás.

### 1.1 Análise de Flutuação Destendenciada

A análise de flutuação destendenciada foi originalmente definida por Peng et al. (1994) para análise de sequências gênicas e, desde então, tem se tornado uma técnica robusta para quantificar correlações em séries temporais não estacionárias, utilizada em diversas aplicações.

O DFA é um aperfeiçoamento do método denominado *Fluctuation Analysis* – FA. A diferença entre os dois é que o DFA elimina a tendência da série temporal em diferentes escalas, analisando flutuações intrínsecas do dado (Freitas et al., 2009).

Resumidamente, o algoritmo para calcular o DFA integra a série de tempo a ser analisada (com  $N$  amostras). Em seguida, a série temporal integrada  $Y(k)$  é dividida em  $n$  intervalos não sobrepostos de tamanho  $s$ , onde  $n_s = \text{int}(N/s)$ . Para cada intervalo  $n_s$ , a tendência local ( $t$ ) é calculada por meio do ajuste local de mínimos quadrados e calcula-se a série “destendenciada” através da diferença entre o perfil  $Y(k)$  e o polinômio  $P_t(k)$ .

Freitas et al. (2009) explicam que, em geral, usa-se o polinômio de grau linear para fazer o ajuste ( $p=1$ ), obtendo-se o DFA1 de primeira ordem, que retira tendências lineares da função perfil  $Y(k)$ . No entanto, polinômios de maior grau podem ser utilizados para retirar tendências de ordens maiores obtendo-se, para cada grau de polinômio  $p$ , um valor da função  $Y_s(k)$  e consequentemente um valor de DFA associado ao grau do polinômio.

Posteriormente calcula-se a variância para cada segmento  $v=1, \dots, n_s$ :

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

E, finalmente, calcula-se a função de flutuação DFA como a média das variâncias de cada intervalo:

$$F(s) = \left[ \frac{1}{n_s} \sum_{v=1}^{n_s} F^2(v, s) \right]^{1/2} \quad (2)$$

A computação do passo 5 é repetida sobre várias escalas temporais, representadas pelo tamanho  $s$  dos intervalos para determinar a relação entre a função de flutuação  $F(s)$  e o tamanho do intervalo  $s$ . Um gráfico log-log da flutuação versus  $s$  é calculado. Relações lineares no gráfico log-log indicam auto-similaridade e o coeficiente angular da reta obtida por regressão linear determina o expoente de auto-similaridade  $\alpha$ , que quantifica a natureza das correlações da série temporal, conforme tabela 1.

**Tabela 1 :** Valores do expoente de escala oriundo do DFA e suas implicações fenológicas.

Valores de $\alpha$	Caracterização	Consequência
$0 < \alpha < 0.5$	Anti-correlações	Valores altos são normalmente seguidos por valores baixos e vice-versa.
$\alpha \approx 0.5$	Ruído branco	Sinal sem nenhuma correlação.
$0.5 < \alpha < 1$	Correlações de longo alcance ou persistentes	Valores altos (baixos) são normalmente seguidos por valores altos (baixos) .
$\alpha \geq 1$	Existe correlação, mas ela deixa de ser na forma da lei de potência $\frac{1}{f^\beta}$	Existem modelos definidos somente para alguns valores específicos de alfa. Ex.: $\alpha = 1.5$ para browniano e $\alpha=1.33$ para turbulência

## 2. Metodologia de Trabalho

Para o cálculo do DFA foram avaliadas séries temporais de velocidade e direção do vento de dez estações localizadas nos estados de São Paulo, Mato Grosso e Goiás. A figura 1 apresenta a localização geográfica de cada estação e a descrição das estações é apresentada na tabela 2.

**Figura 1 :** Localização geográfica das estações de vento analisadas**Tabela 2 :** Estações de vento estudadas e suas principais características estatísticas e de localização.

Estação	Localização			Estatística de Velocidade				Estatística de Direção	
	Latitude	Longitude	Altitude	Média	Variância	Assimetria	Curtose	Assimetria	Curtose
Andradina	20° 46' 01.00" S	51° 15' 31.00" W	354	5.103	12.463	0.566	3.221	1.018	3.468
Cananéia	25° 00' 45.00" S	47° 55' 44.00" W	0	2.727	9.199	1.185	4.403	1.992	0.298
Ilha Solteira	20° 25' 41.00" S	51° 20' 33.00" W	379	2.866	9.458	0.946	3.735	1.215	3.793
Itumbiara*	18° 17' 00.90" S	48° 54' 19.40" W	500	7.069	9.676	0.326	2.889	1.006	2.876
Rio Claro	22° 24' 01.00" S	47° 42' 38.00" W	622	1.214	3.073	1.766	8	1.018	3.468
Tatuí	23° 19' 49.00" S	47° 53' 55.01" W	600	2.063	5.404	1.554	7.649	-0.176	2.386
Teodoro Sampaio	22° 31' 44.00" S	52° 09' 47.00" W	318	3.60	8.669	0.798	3.926	0.523	2.568
Três Lagoas	20° 47' 07.00" S	51° 39' 57.00" W	302	1.909	3.793	1.261	8.766	0.483	2.210
Ubatuba	23° 25' 02.00" S	45° 06' 52.00" W	10	0.2529	1.019	13.136	279.338	0.5112	2.137
Votuporanga	20° 26' 12.00" S	49° 58' 12.99" W	504	0.3829	5.276	0.6012	4.095	0.6954	2.657

\* Medido a 10 m

As séries de velocidade do vento foram filtradas para retirar valores referentes à rajadas de vento, definidas acima de 25 m/s. Para cada série, calculou-se a função de flutuação para tamanhos de série que variavam de 4 a  $n/4$ , onde  $n$  era a quantidade de dados amostrados. Para o cálculo do DFA foi utilizado um software implementado em C e disponível no site da

PhysioNet. O cálculo do DFA foi feito para os polinômios interpoladores de primeiro, segundo, terceiro e quarto graus.

As séries de direção do vento também foram tratadas para refletirem seu valor absoluto. Isso porque, como o dado é angular, valores próximos de  $360^\circ$  e  $0^\circ$ , por exemplo, referem-se a mesma direção (Norte). Dessa forma, Santos (2010) corrigiu esse falso incremento utilizando a expressão definida por Van Doorn et al. (2000), onde os incrementos de direção  $\Delta\theta = \theta_{(i+1)} - \theta_i$  devem ser corrigidos pela expressão:

$$\Delta\theta = \Delta\theta - \left(\frac{\Delta\theta}{|\Delta\theta|}\right) * 360, \text{ para } |\Delta\theta| > 180 \quad (3)$$

Assim, por exemplo, se no tempo  $i$  a direção era  $240^\circ$  e no tempo  $i+1$  a direção foi  $10^\circ$ , o  $\Delta\theta$  será de  $-230$ . Como o valor absoluto é maior que 180, o valor é corrigido para chegar ao incremento real de  $130^\circ$ .

Após o cálculo dos valores de DFA, calculou-se a correlação entre esses valores e a altitude e latitude (apenas o grau) de cada estação.

### 3. Resultados e Discussão

A tabela 3 apresenta os valores da média de DFA dos quatro graus de polinômios para as séries analisadas. Verifica-se que em todas as séries o coeficiente de escala global ficou entre 0,5 e 1, indicando que existe uma correlação de longo alcance persistente. Ou seja, velocidades altas de vento são seguidas por velocidades altas, enquanto velocidades baixas são seguidas por velocidades baixas. Os resultados corroboram os resultados encontrados por (Araújo et al., 2010; Kavasseri e Nagarajan, 2004; Koçak, 2009; Santos, 2010) e indicam que as regiões são candidatas a instalação de parques eólicos.

**Tabela 3** : Valores de DFA médio para os quatro graus de polinômio para as séries de velocidade do vento e direção. Os valores destacados de verde indicam os maiores valores de  $\alpha$ . Os valores destacados de vermelho indicam os menores valores de  $\alpha$ .

Estação	$\alpha$ (velocidade)	$\alpha$ (direção)	$\alpha$ (direção absoluta)
Andradina	0.8205	0.7925	0.7171
Cananéia	0.7666	0.7591	0.7143
Ilha Solteira	<b>0.8475</b>	0.8043	<b>0.7306</b>
Itumbiara	0.7781	<b>0.8372</b>	0.6851
Rio Claro	0.6795	0.8125	<b>0.6365</b>
Tatuí	0.6891	0.6726	0.6449
Teodoro Sampaio	0.7865	0.7749	0.7063
Três Lagoas	0.7459	0.8347	0.6727
Ubatuba	<b>0.5828</b>	<b>0.6449</b>	0.7216
Votuporanga	0.7644	0.7829	0.6785

Kavasseri e Nagarajan (2004) fizeram um estudo para quantificar correlações de longo alcance em séries de velocidade de vento da Dakota do Norte (EUA) utilizando o DFA. Três sítios foram avaliados em séries de média horária de velocidade do vento entre 2001 e 2003. O DFA confirmou a existência de correlação de longo alcance nas séries estudadas e revelou que, para intervalos de tempo maior que 100 horas, a série apresenta uma correlação persistente. Koçak (2009) também aplicou DFA em séries de média horária de velocidade do vento de vinte sítios no noroeste da Turquia. Neste trabalho o autor corroborou os resultados

encontrados no EUA por Kavasseri e Nagarajan (2004). O autor concluiu que nas vinte estações medidas, houve correlação de longo alcance para escalas maiores de 100 dias. Outra conclusão importante desse trabalho foi que o autor não encontrou relação entre o DFA e a localização geográfica da estação.

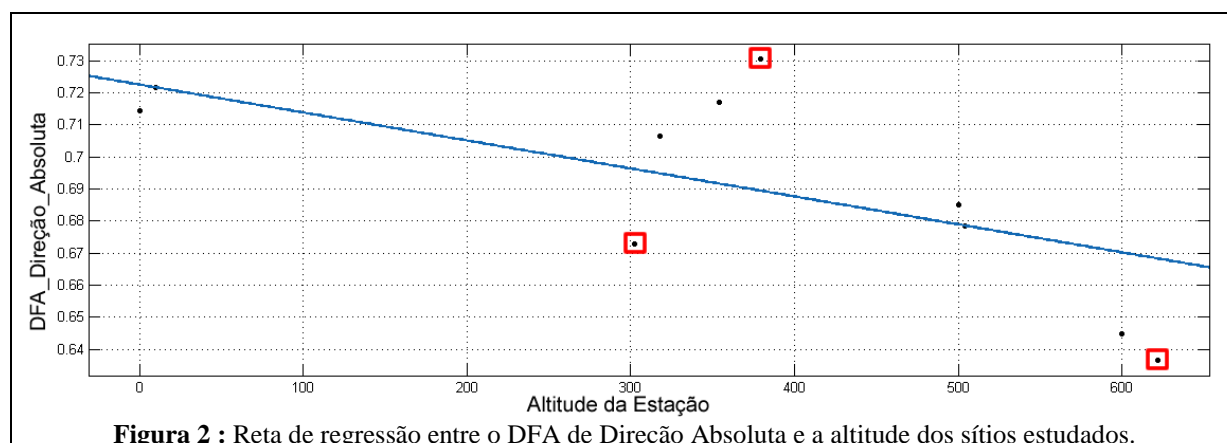
No Brasil, Santos (2010) aplicou o DFA em séries de média horária de velocidade e dos incrementos da direção do vento em quatro sítios localizados no Estado de Pernambuco. A autora encontrou correlação de longo alcance persistente em todas as séries analisadas. As séries de velocidade de vento apresentaram persistência maior do que as de direção. Para os sítios estudados também não houve relação explícita entre a localização geográfica da estação e o DFA. Araújo et al. (2010) também aplicaram DFA para séries temporais de velocidade do vento no estado da Paraíba. Também houve estações com diferentes regimes e, para intervalos maiores que 30 horas, as séries apresentavam correlações de longo alcance persistentes. Intervalos menores que 30 horas revelou séries na forma de ruídos brownianos.

A tabela 4 apresenta a correlação entre os valores de DFA e a altitude e latitude de cada estação. Apesar de nos trabalhos da literatura consultados, os autores não encontrarem correlação entre o valor de DFA e a altitude e latitude da estação, nesse trabalho, percebeu-se que existe uma correlação negativa entre a altitude da estação e o DFA da direção absoluta do vento.

**Tabela 4** : Correlação entre os valores de DFA e a altitude e Latitude das estações estudadas.

	<b>Intensidade</b>	<b>Direção</b>	<b>Direção Absoluta</b>
<b>Altitude</b>	0.1695	0.3429	<b>-0.7223</b>
<b>Latitude</b>	-0.4722	-0.6531	0.0108

Na figura 2 verifica-se a reta de regressão, cujo coeficiente de correlação é 0.5015. Os pontos mais afastados da curva (circundados de vermelho) referem-se a Ilha Solteira, Três Lagoas e Rio Claro. Os sítios Três Lagoas e Ilha Solteira estão localizados na divisa entre os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul (figura 1). Rio Claro localiza-se na região mais central de São Paulo. Não foram encontradas relações evidentes entre as séries, mas fica evidente que a localização espacial das estações de Três Lagoas e Ilha Solteira influencia esse resultado e precisa ser melhor investigado.



#### 4. Conclusões

Os resultados preliminares indicam que as séries apresentam persistência, tanto na direção quanto na velocidade dos ventos. Esse é um indicativo importante para o objetivo final do trabalho que é energia eólica. Os resultados iniciais indicaram também que existe correlação

entre a altitude da estação e o DFA da direção absoluta do vento. Torna-se necessário agora investigar melhor essa relação e as relações fenomenológicas envolvidas.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) pelo apoio financeiro.

### Referências Bibliográficas

ARAÚJO, A. et al. **Análise da correlação temporal da velocidade do vento** 19º SINAPE - Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística. **Anais...**São Pedro/SP: 2010Disponível em:

<[http://www.ime.unicamp.br/sinape/sites/default/files/\\_IAN%C3%81LISE DA CORRELA%C3%87%C3%83O TEMPORAL DA VELOCIDADE DO VENTO final.pdf](http://www.ime.unicamp.br/sinape/sites/default/files/_IAN%C3%81LISE%20DA%20CORRELA%C3%87%C3%83O%20TEMPORAL%20DA%20VELOCIDADE%20DO%20VENTO%20final.pdf)>

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2013** – Ano base 2012 : Relatório Síntese. Disponível em : <

[https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final\\_2013\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2013_Web.pdf) >. Acesso em 22 Nov. 2014

FREITAS, R. M. DE et al. **Análise de anisotropia de imagens utilizando o método DFA : um estudo de caso na área de exploração de petróleo**Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto Sensoriamento. **Anais...**2009

KAVASSERI, R. G.; NAGARAJAN, R. Evidence of crossover phenomena in wind speed data. **Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on**, v. 51, n. 11, p. 2255-2262, 2004.

KOÇAK, K. Examination of persistence properties of wind speed records using detrended fluctuation analysis. **Energy**, v. 34, n. 11, p. 1980-1985, nov. 2009.

MAGNAGO, R.; FISCH, G.; MORAES, O. Análise espectral do vento no centro de lançamento de Alcântara( CLA ). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 260-269, 2010.

OLAOFE, Z. O.; FOLLY, K. A. Wind energy analysis based on turbine and developed site power curves: A case-study of Darling City. **Renewable Energy**, v. 53, p. 306-318, maio. 2013.

PENG, C. K. et al. Long-range correlations in nucleotide sequences. **Phys. Rev. E**, v. 49, p. 1685-1689, 1994.

SANTOS, M. O. **Correlações de longo alcance em séries temporais da velocidade e da direção do vento**. [s.l.] Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2010.

VAN DOORN, E. et al. Statistics of wind direction and its increments. **Physics of Fluids**, v. 12, n. 6, p. 1529-1534, 2000.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. 2 Ed. ed. Brasília/DF: INMET, 2001. p. 532