

## CORRELAÇÕES DE LONGO ALCANCE DA VELOCIDADE DO VENTO EM DIFERENTES REGIÕES NO ESTADO DA BAHIA

José Vicente Cardoso Santos - prof.vicentecardoso@gmail.com  
Gilson Amorim Carvalho - gilson.carvalho@unijorge.edu.br

**Resumo:** Este trabalho mostra uma análise de séries temporais registradas em diferentes alturas em três torres anemométricas de 150 m no estado da Bahia, nas localidades de Esplanada, Mucuri e Mucugê, com fins de detecção de leis de potência associadas. Para tal fim, é utilizado o método DFA (*Detrended Fluctuation Analysis*), confrontando os dados reais com valores correspondentes simulados no modelo de mesoescala WRF (*Weather Research and Forecasting*), os quais evidenciam o registro de um *crossover* no comportamento das leis de potência associadas. A análise dos dados reais e simulados mostram claramente correlações com leis de potência com duas regiões de escala distintas, de forma mais acentuada nos dados reais e menos acentuada nos dados simulados, em horizontes de médio e longo prazo.

*Palavras Chaves:* Velocidade do vento; DFA; WRF; Leis de potência.

### 1. Introdução

O Brasil tem um forte potencial para a geração de energia eólica e demandas emergentes de providências para inserção deste recurso na matriz energética nacional [1]. Uma destas demandas, além das técnicas de geração, aproveitamento, transmissão *etc*, reside em uma demanda legal de previsibilidade da potência gerada e que está associada à velocidade dos ventos locais no tempo [2]. Neste sentido, as previsões do comportamento das velocidades de vento são fundamentais para um bom desempenho na geração de energia eólica.

Com estas características singulares e com a factibilidade do armazenamento de séries históricas locais, é possível um estudo do comportamento dos ventos locais com fins de previsão de suas características, de forma que, isto indica que as suas propriedades podem ser investigadas utilizando-se conceitos e métodos da teoria fractal [3], ou seja, com a análise de flutuações no tempo.

Quando a série é correlacionada,  $C(s)$  é uma função decrescente para diferentes valores de  $s$ . Se a função  $C(s)$  decai exponencialmente, diz-se que a série possui correlação de curto alcance ou memória de curta duração. Por outro lado, em um

processo de memória longa, a função de autocorrelação decai como uma lei de potência com  $c_s = c_s^{-\alpha}$ . Em que  $C$  é uma constante,  $s$  é o tempo entre as observações e  $\alpha$  representa o expoente de correlação [4]. Desta forma, o DFA representa a eliminação da tendência da série temporal em diferentes escalas, analisando flutuações intrínsecas dos dados [5, 6].

## 2. Procedimentos experimentais e computacionais

As séries temporais da velocidade do vento analisadas têm duas categorias: séries medidas, com horizonte cronológico de sessenta dias (1440 horas) e, séries geradas em simulação com o modelo de mesoescala WRF, as quais foram confrontadas com as séries experimentais em cenários de equivalência de localização, alturas e cronologia.

A aquisição de dados de velocidade do vento foi feita em três torres de monitoramento de vento diferentes localizadas nos municípios baianos de Esplanada, Mucuri e Mucugê, conforme elencadas na Tabela 1.

Tabela 1: Localização das Torres Anemométricas Analisadas [1]

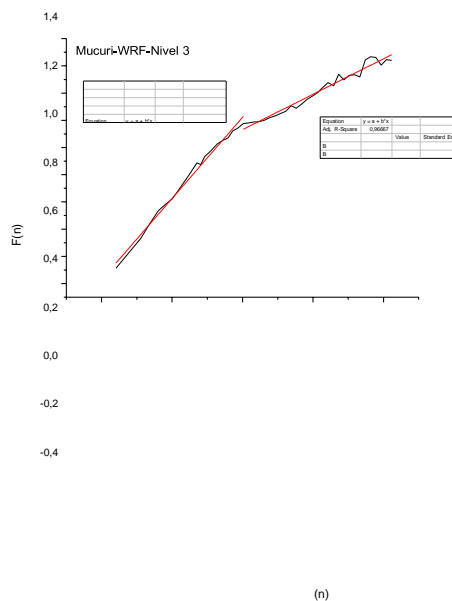
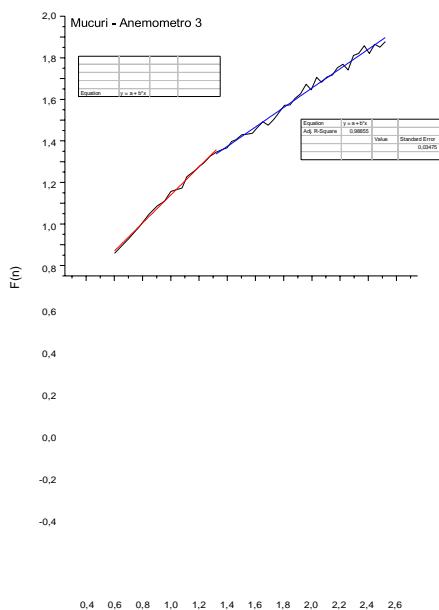
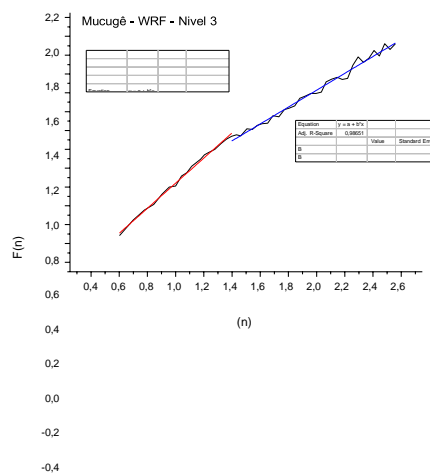
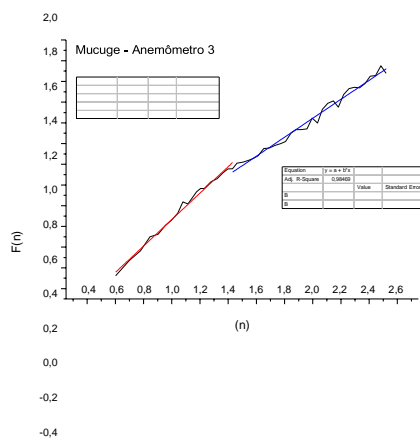
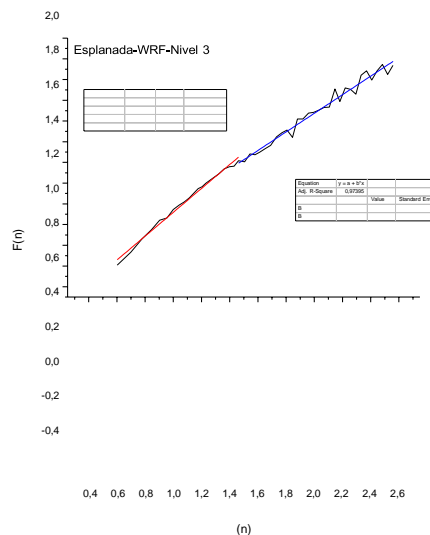
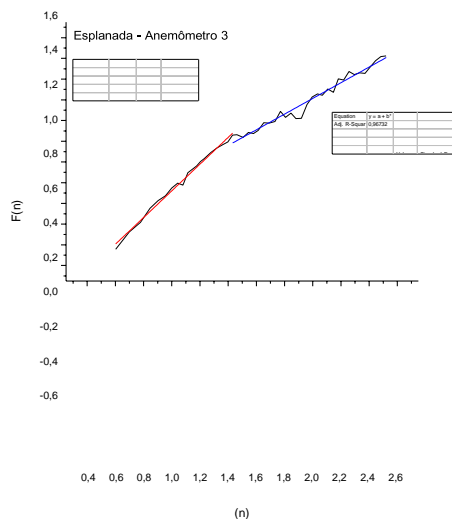
Local	Latitude	Longitude	Elevação Geográfica (m)	Elevação do Anemômetro (m)			
				I	II	III	IV
Esplanada	11° 47' 45" S	37° 56' 42" O	140 m	80	100	120	150
Mucugê	13° 00' 18" S	41° 22' 15" O	984 m				
Mucuri	18° 05' 09" S	39° 33' 03" O	7 m				

As simulações incluíram 24h de spin-up para obtenção de condições iniciais realistas, ou seja, a simulação para cada mês foi inicializada a partir das 00:00 UTC do último dia do mês anterior. Além disto, foram usadas as seguintes parametrizações físicas: o esquema MYJ para camada limite planetária (PBL), Eta para a camada superficial e WDM6 para microfísica.

## 3. Resultados e discussões

A retirada da tendência da série temporal em diferentes escalas, analisando flutuações intrínsecas dos dados. Desta forma, é possível permitir o registro de existência de correlação entre a série e lei de potência, indicando uma tendência previsível de comportamento da mesma [7], o que irá desdobrar-se em previsibilidade da potência eólica local. Este fato é registrado com os dados reais bem como com os dados de simulação. Verifica-se em todas as torres e, em todos os respectivos anemômetros existentes nas mesmas (quatro em cada uma das três torres em estudo), dois patamares distintos no expoente da lei de potência, denominado *crossover* e já reconhecido em literatura sobre a temática e afins [8], [9] e [10]. Observa-se nos dados reais que a divergência entre estes patamares é mais notória do que nos dados em simulação, conforme verifica-se na Figura 2.

**Figura 2:** Comparativo de leis de potência registradas na velocidade dos ventos em dados reais (esquerda) e dados simulados (direita) nas torres de Esplanada, Mucugê e Mucuri, em alturas equivalentes.



Além disto, em análise do DFA, verifica-se que o registro do *crossover* pode ser devido à existências de dois ou mais fenômenos que ocorrem em escala de tempo múltipla [8]. Neste caso, supõe-se que estes fenômenos podem ser as contribuições dos ventos locais e dos ventos sinóticos, que são oriundos do gradiente de temperatura e geomorfologia locais e a dinâmica global, respectivamente. Evidencia-se também que existem, na literatura, de registros de existência leis de potência em ambos os patamares do *crossover*, ou seja, existem leis de potência para as contribuições locais e sinóticas das componentes de velocidade dos ventos e que elas ocorrem em duas escalas temporais distintas, onde os ventos locais têm oscilações mais frequentes e instáveis e os ventos sinóticos um período mais longo e estável [8], [9] e [10].

Evidencia-se ainda, na Tabela 2, a seguir, que as oscilações, mínimas e máximas, da velocidade dos ventos, em todos os níveis analisados, têm maiores amplitudes, mínimas e máximas, para os dados simulados do que para os dados reais, ao tempo em que os valores mínimos simulados são sempre menores do que os valores reais, e os valores simulados máximos também sempre são superiores aos valores máximos reais locais por torre e anemômetro. Este fato indica superestimação/subestimação dos valores de velocidade para os dados simulados em todos os valores preditos, mínimos e máximos, conforme se observa na Tabela 2.

Tabela 2: Extremos de velocidades nas torres e anemômetros.

Localidades	Valores de Velocidades (m/s)															
	Dados medidos								Dados WRF							
	Anemômetros								Níveis de valores simulados							
	I		II		III		IV		I		II		III		IV	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Esplanada	0,40	11,40	0,39	9,85	3,53	9,94	4,43	9,93	4,01	17,98	0,29	19,33	0,20	19,38	0,19	19,44
Mucugê	6,8	9,99	0,97	14,42	1,11	15,34	1,25	15,62	0,19	18,32	0,08	18,60	0,13	18,94	0,21	18,97
Mucuri	0,93	16,69	0,95	16,43	0,91	16,67	0,98	16,47	0,34	16,33	0,11	16,30	0,09	16,29	0,17	16,15

Os anemômetros das torres anemométricas têm desvio padrão de  $\pm 0,04$  para todos os valores de velocidades.

Pode-se observar que os valores em simulação, por não considerarem os aspectos da gradiente de temperatura, pressão e geomorfologia locais, prediz em excessos os valores de velocidade de ventos e não considera as taxas atenuantes do desequilíbrio entre as forças de gradiente, ou seja, os dados simulados consideram em menor fatores atenuantes das velocidades dos ventos locais.

Além disto, considerando-se que os coeficientes angulares das retas ajustadas no DFA indicam anti-correlações (para valores do coeficiente angular entre  $0 < \alpha < 0,5$ ), ou seja, quando tem-se valores altos, são normalmente seguidos por valores baixos e vice-versa, indicando ciclos oscilantes nas máximas e mínimas de velocidades dos ventos.

Verifica-se também que, eventuais ruídos (para valores do coeficiente angular  $\alpha \approx 0,5$ ), que são sinais sem nenhuma correlação e para correlações de longo alcance (para valores do coeficiente angular  $0,5 < \alpha < 1$ ), ou seja, quando os valores altos (ou baixos) são normalmente seguidos por valores altos (ou baixos); e correlações que não estejam na forma de leis de potência  $\alpha \geq 1$ , de formas que existem modelos definidos somente para alguns valores específicos de  $\alpha = 1,5$  para ruídos brownianos e  $\alpha = 1,5$  e  $\alpha = 1,33$  para a turbulência [4].

A Tabela 3 mostra a análise dos coeficientes angulares das retas em ajuste dos mínimos quadrados para a verificação com coeficiente (n) em lei de potência associada.

Tabela 3: Comparativos dos expoentes de escala de dados reais e simulados.

Comparativo dos expoentes de escala Antes e Depois do crossover (60 dias)																
Localidade / Dados Reais (Torres Anemométricas)	Valores de Expoente de Escala F(n)/n															
	Anemômetro I				Anemômetro II				Anemômetro III				Anemômetro IV			
	$\alpha_1$	$\sigma_1$	$\alpha_2$	$\sigma_2$	$\alpha_1$	$\sigma_1$	$\alpha_2$	$\sigma_2$	$\alpha_1$	$\sigma_1$	$\alpha_2$	$\sigma_2$	$\alpha_1$	$\sigma_1$	$\alpha_2$	$\sigma_2$
Esplanada	1,27	0,026	0,79	0,026	1,27	0,026	0,79	0,026	1,29	0,027	0,76	0,025	1,30	0,025	0,73	0,025
Mucugê	1,31	0,031	0,90	0,020	1,43	0,058	0,88	0,013	1,27	0,031	0,91	0,021	1,29	0,029	0,90	0,020
Mucuri	1,56	0,027	0,89	0,026	1,53	0,029	0,91	0,033	1,57	0,026	0,85	0,017	1,15	0,030	0,82	0,022

Localidade / Dados Simulados (WRF)	Valores de Expoente de Escala F(n)/n															
	Nível I				Nível II				Nível III				Nível IV			
	$\alpha_1$	$\sigma_1$	$\alpha_2$	$\sigma_2$	$\alpha_1$	$\sigma_1$	$\alpha_2$	$\sigma_2$	$\alpha_1$	$\sigma_1$	$\alpha_2$	$\sigma_2$	$\alpha_1$	$\sigma_1$	$\alpha_2$	$\sigma_2$
Esplanada	1,23	0,022	0,78	0,022	1,85	0,022	0,88	0,023	1,15	0,027	0,90	0,024	1,19	0,025	0,90	0,024
Mucugê	1,31	0,031	0,90	0,020	1,30	0,024	0,89	0,019	1,33	0,022	0,89	0,018	1,33	0,025	0,91	0,024
Mucuri	1,16	0,021	0,46	0,019	1,18	0,029	0,52	0,033	1,19	0,025	0,52	0,018	1,23	0,027	0,52	0,017

Observações:  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são os expoentes da lei de potência para os dois ajustes lineares e  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  os desvios padrões respectivos.

Ao comparar-se os dados dos anemômetros reais (I, II, III, IV) com os dados simulados dos respectivos valores em alturas das simulações (N1, N2, N3, N4) verifica-se que: nas regiões de Esplanada, Mucugê e Mucuri, para as os dados medidos, tem-se os efeitos da turbulência como reinantes, pois os valores do coeficiente angular  $\alpha$  indicam a existência de correlação com indicativo de sinais de turbulência. Verifica-se também que, nos patamares acima do *crossover*, tem-se a indicação de correlações de longo alcance ou persistentes, pois os valores do coeficiente angular  $\alpha$  são superiores a 0,5 e inferiores a unidade, indicando correlações.

Este cenário está em de acordo com o que é preceituado nos dados simulados, não obstante, os valores acentuados das velocidades em simulação não estão em de acordo com a fenomenologia registrada nas bases de dados em consulta, conforme já evidenciado anteriormente.

#### 4. Conclusões

Verifica-se que os resultados corroboram para uma melhor compreensão da dinâmica da velocidade do vento nas localidades de Esplanada, Mucuri e Mucugê, onde a velocidade média e máxima do vento estão, em alguns casos, encontrados como equivalentes, e em outros casos, bastante diferentes um do outro, sem indicação clara quanto à causa dessas semelhanças ou diferenças em termos de posição geográfica, altitude ou clima. Estes registros devem provar-se úteis para a validação de modelos climáticos globais [11] [12], uma vez que um modelo válido deve explicar propriedades de escala empiricamente detectadas em dados observados.

Desta forma, a análise com o DFA indicou um cruzamento e revelou a existência de pelo menos dois expoentes de escala distintos ao longo do período analisado, ratificando a existência de *crossover* para cada uma das análises dos dados reais e simulados, indicando a existências de dois ou mais fenômenos com escala de tempo diferenciada.

Entretanto para baixas escalas de análise tem-se a semelhança dos dados a processos sub-difusivos ao tempo em que correlações persistentes são sempre registradas ao longo de escalas de tempo mais longas.

Cabe ressaltar também que fatores como: elevação, altura de rugosidade, distância do mar e orografia afetam a magnitude da velocidade do vento, mas não afetam a sua estrutura temporal nem a existência dos ciclos curtos e longos. Evidencia-se também que o fenômeno de *crossover* sempre ocorre de forma mais evidente nos dados reais e mais sutis nos dados simulados, visto que os mesmos ignoram customizações locais.

#### References

- [1] ABE EÓLICA. **Energia Eólica**. Disponível em: <http://www.abeeolica.org.br/site/zpublisher/secoes/home.asp>. Acesso em: 10 set 2014.
- [2] BRASIL. **Empresa de Pesquisa Energética**. Balanço Energético Nacional 2014 - Ano base 2013: Relatório Síntese. Disponível em: [https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final\\_2014\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2014_Web.pdf) >. Acesso em 7 jul. 2016.
- [3] SOMAN, Saurabh S.; ZAREIPOUR, Hamidreza; MALIK, Om; MANDAL, Paras. **Review of Wind**

- Power and Wind Speed Forecasting Methods With Different Time Horizons.** North American Power Symposium (NAPS), set, 2010.
- [4] PENG, C-K. *et. al.* **Mosaic organization of DNA nucleotides.** Physical Review E, v. 49, n. 2, pp. 1685-1989, 1994.
- [5] WEISSER, D. **A wind energy analysis of Grenada: an estimation using the Weibull density function.** Renewable Energy, Denver, v. 28, n. 11, p.1803-1812, 2003.
- [6] MORET, M. A.; SENNA, V. de; ZEBENDE, G. F.; VAVELIUK, P. **X-ray binary systems and nonextensivity.** Physica A. 389: 854-858, 2010.
- [7] JUSTUS, C. G.; MIKHAIL, A. **Height Variation of Wind Speed and Wind Distribution.** Geophysical Research Letters, v. 3, p. 261-264, 1976.
- [8] KAVASSERI, R. G. **Evidence of crossover phenomena in wind speed data.** IEEE Transactions on Circuits and Systems, v. 5, pp. 165-173, 2006.
- [9] JARAMILLO, O. A.; BORJA, M. A. **Wind speed analysis in La Ventosa, Mexico: a bimodal probability distribution case.** Renewable Energy, v.29, pp. 1613–1630, 2004.
- [10]VICENTE, Diego; BELTRÃO, Djalma. PERCEUS, Milton; STOSIC, Tatijana. STOSIC, Borko. **Análise da correlação temporal da velocidade do vento Anderson Araújo.** Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada, Universidade Federal Rural de Pernambuco Rua Dom Manoel de Medeiros s/n, 52.171-900, Recife - PE.
- [11]Bunde A, Havlin S, Koscielny-Bunde E, Schellnhuber H-J. **Long term persistence in the atmosphere: global laws and tests of climate models.** Physica A 2001; 302:255–67.
- Kira`ly A, Bartos I, Ja`nosi IM. **Correlation properties of daily temperature anomalies over land.** Tellus A 2006;58:593–600.