

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

J. V. Cardoso Santos, vicente.cardoso@fieb.org.br¹
D. M. Moreira, davidson.moreira@fieb.org.br¹
Marcelo A. Moret, moret@fieb.org.br¹

¹ Campus Integrado de Manufatura e Tecnologia SENAI CIMATEC, Avenida Orlando Gomes, 1845 - Piatã, Salvador - BA, Brasil. Cep.: 41650-010.

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 simulados através do modelo 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 observados e menos acentuada nos dados simulados, em horizontes de médio e longo prazo.

Palavras-chave: Velocidade do vento, DFA, WRF, Leis de potência.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil tem um alto potencial de geração de energia eólica e demandas emergentes de providências para inserção deste recurso na matriz energética nacional (ABE Eólica, 2014). 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 (Brasil, 2013). Neste sentido, as previsões do comportamento das velocidades de vento são fundamentais para um bom desempenho na geração de energia eólica.

O campo de velocidade dos ventos é influenciado por vários fatores, onde as séries temporais geradas através de medidas (ou simuladas) das variáveis são conjuntos de dados coletados, geralmente, em intervalos regulares, periódicos ou não, e que distinguem-se de dados coletados aleatoriamente, pois representam a evolução temporal da dinâmica dos dados em análise. 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 predição de suas características. Desta forma quando uma série apresenta correlação de memória longa, isto indica que as suas propriedades podem ser investigadas utilizando-se conceitos e métodos da teoria fractal (Soman, Zareipour, Malik e Mandal, 2010).

Um processo aleatório pode apresentar memória de longa duração quando um evento passado tem efeito sobre eventos futuros, que podem ser esquecidos à medida que o tempo avança. Assim, para definir processos com memória longa adota-se o DFA (*Detrended Fluctuations Analyses*), que verifica a existência da função de autocorrelação $F(s)$, pois, quando uma série temporal é correlacionada, um valor $Y(t)$ no tempo t correlaciona com um valor $Y(t+s)$, em que s é um incremento qualquer de tempo no futuro. No caso mais trivial, em que a série não é correlacionada $F(s) = 0$, para $s > 0$. Quando a série é correlacionada, $F(s)$ é uma função decrescente para diferentes valores de s . Se a função $F(s)$ 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 $F_s = F_s^{-\alpha}$. Em que F é uma constante, s é o tempo entre as observações e α representa o expoente de correlação (Peng *et al.*, 1994). Desta forma, o DFA representa a eliminação da tendência da série temporal em diferentes escalas, analisando flutuações intrínsecas dos dados (Weisser, 2003) e (Moret; Senna, Zebende, Vaveliuk, 2010).

Com isto, nesta pesquisa, utiliza-se a análise dos dados da velocidade do vento em diferentes regiões no estado da Bahia (nos municípios de Esplanada, Mucuri e Mucugê) através da sua análise com o uso do DFA para verificar a existência de correlações de longo alcance da velocidade do vento e comparação com dados análogos que é simulado no *software* WRF para as mesmas regiões, em diferentes alturas e durante os mesmos períodos de análise, ou seja, nos meses de janeiro e fevereiro do ano de 2016.

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 numérico WRF (Skamarock *et al.*, 2008), que é um modelo de mesoescala, 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 nos municípios baianos de Esplanada, Mucuri e Mucugê, conforme elencadas na Tabela 1.

Tabela 1: Localização das Torres Anemométricas Analisadas

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 velocidades do vento são adquiridas por quatro anemômetros localizados em alturas diferentes nas torres meteorológicas, de forma que em cada torre tem quatro níveis de altura de medição com um anemômetro em cada nível, que registram cada um, uma integralização de medida a cada 10 minutos e médias a cada 60 minutos em horizonte de 60 dias nos meses de janeiro e fevereiro de 2016. Os dados simulados também foram filtrados de forma similar.

O modelo WRF (versão 3.9) foi configurado com dois domínios aninhados com resoluções de grade de 9 e 3 km, respectivamente. Interior ao segundo domínio, que abrange todo o estado da Bahia, três domínios foram projetados com resoluções de grade de 1 km, centrados nas três torres anemométricas: os dois domínios maiores têm dimensões horizontais de 223x223 e 420x420 células, respectivamente, e 60x60 células para os domínios menores envolvendo as torres. Desta forma, para a inicialização do WRF, foram utilizados dados do National Centers for Environmental Prediction (NCEP), Final Analysis (FNL), com resolução de 0,25°. Os dados de uso do solo foram fornecidos pelo United States Geological Survey (USGS) com resolução de 2' para o domínio maior e 30'' para os demais. 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

Os dados, medidos e simulados, foram submetidos a análise de flutuação destendenciada, ou seja, retirada a 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, 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 (Justus; Mikhail, 1976).

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 (Kavasseri, 2006; Jaramillo; Borja, 2004; Vicente; Beltrão; Perceus, 2010).

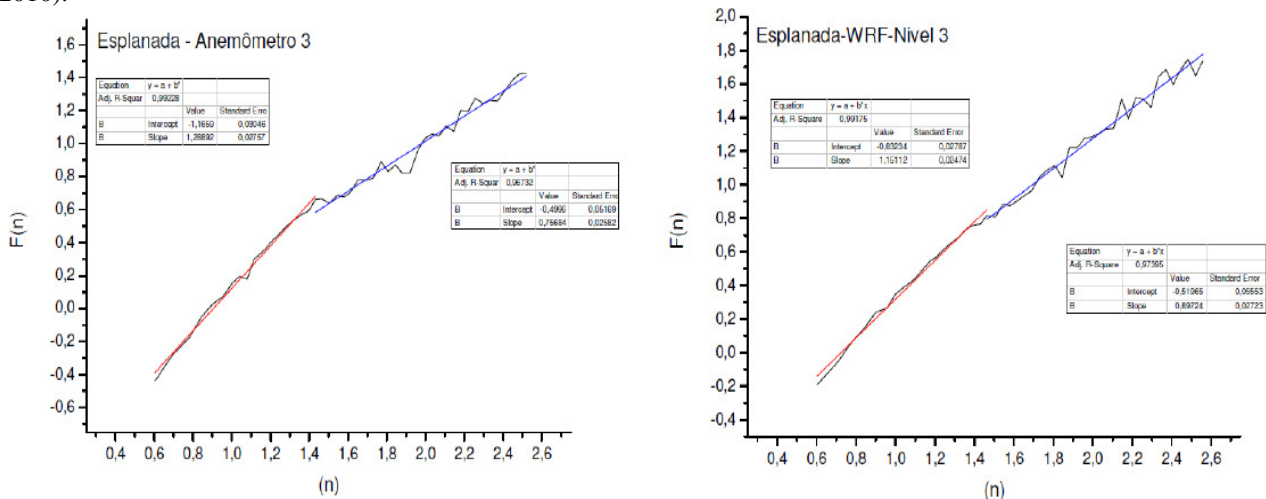


Figura 1: Comparativo de leis de potência registradas na velocidade dos ventos em dados reais (esquerda) e dados simulados (direita) na torre de Esplanada em alturas equivalentes.

Observa-se nos dados reais que a divergência entre estes patamares é mais notória do que nos dados em simulação conforme se pode verificar nas figuras 1, 2 e 3.

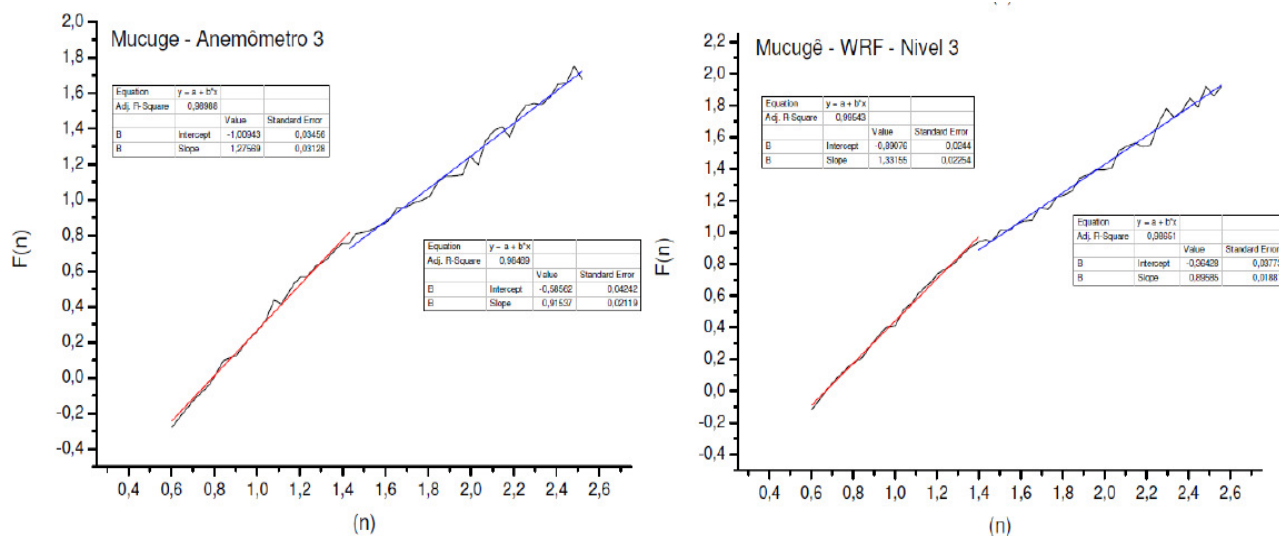


Figura 2: Comparativo de leis de potência registradas na velocidade dos ventos em dados reais (esquerda) e dados simulados (direita) na torre de Mucugê em alturas equivalentes.

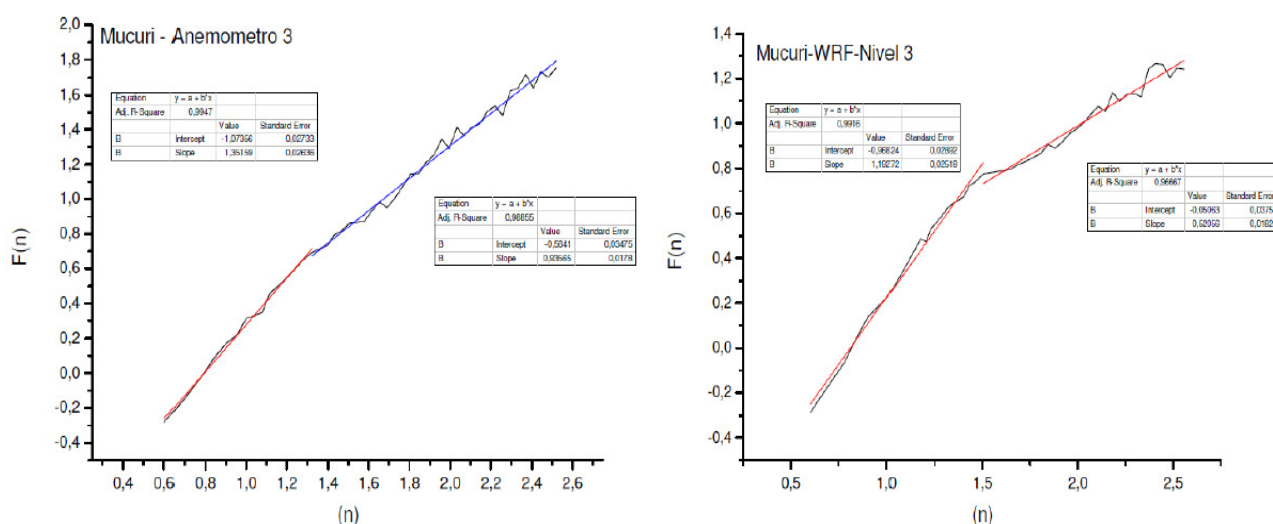


Figura 3: Comparativo de leis de potência registradas na velocidade dos ventos em dados reais (esquerda) e dados simulados (direita) na torre de Mucuri em alturas equivalentes.

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. Entretanto 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

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.
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 simulados no WRF, apesar de considerarem os aspectos da temperatura, da pressão em altitude e geomorfologia locais, superestimam os valores de velocidade do vento. Provavelmente o aumento da resolução usada nas simulações pode melhorar os resultados. 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 $\alpha \cong 0,5$), 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 (Peng *et al.*, 1994).

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			
	α_1	σ_1	α_2	σ_2	α_1	σ_1	α_2	σ_2	α_1	σ_1	α_2	σ_2	α_1	σ_1	α_2	σ_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			
	α_1	σ_1	α_2	σ_2	α_1	σ_1	α_2	σ_2	α_1	σ_1	α_2	σ_2	α_1	σ_1	α_2	σ_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: α_1 e α_2 são os expoentes da lei de potência para os dois ajustes lineares e σ_1 e σ_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 os dados medidos, tem-se os efeitos da turbulência como reinantes, pois os valores do coeficiente angular α 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 α 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 concordância com a fenomenologia registrada nas bases de dados em consulta, conforme já evidenciado anteriormente.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho, verifica-se que os resultados contribuem 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 (Bunde; Havlin; Koscielny-Bunde; Schellnhuber, 2001), (Kira; Bartos, 2006), 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. Não é observada correlação entre os expoentes de escala e topografia (elevação e distância do mar) das torres nos dados medidos e simulados, visto que as correlações foram detectadas em ambos os casos.

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.

O comportamento de escala foi detectado em todas as três torres e em todos os níveis de análise e independe das elevações das mesmas. A inerente heterogeneidade dos dados, reais e simulados, mantem certas características quantitativas da velocidade do vento, não obstante, os fatores físicos incluindo topografia e variações termodinâmicas acabam por contribuir para a variação das médias de velocidade do vento, mas não do seu comportamento.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado (através de bolsa de pesquisa) pelo Campus Integrado de Manufatura e Tecnologia SENAI CIMATEC, BA, Brasil, a qual agradecemos e reiteramos a colaboração em estrutura, seção de dados e procedimentos computacionais bem como o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) devido ao informe dos dados e disponibilidade de fornecimento de informações e bases de dados.

6. REFERENCIAS

- ABE Eólica. “Energia Eólica”. Disponível em: <http://www.abeeolica.org.br/site/zpublisher/secoes/home.asp>. Acesso em: 10 set 2014.
- 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. Acesso em 7 jul. 2016.
- 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.
- Peng, C-K. *et. al.* “Mosaic organization of DNA nucleotides”. Physical Review E, v. 49, n. 2, pp. 1685-1989, 1994.
- 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.
- Moret, M. A.; Senna, V. de; Zebende, G. F.; Vaveliuk, P. “X-ray binary systems and nonextensivity”. Physica A. 389: 854-858, 2010.
- Justus, C. G.; Mikhail, A. “Height Variation of Wind Speed and Wind Distribution”. Geophysical Research Letters, v. 3, p. 261-264, 1976.
- Kavasseri, R. G. “Evidence of crossover phenomena in wind speed data”. IEEE Transactions on Circuits and Systems, v. 5, pp. 165-173, 2006.
- 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.
- 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. 2010.
- 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.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X., Wang, W., Powers, J. G., 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. National Center for Atmospheric Research/Boulder, Colorado, USA.

Kiraly A, Bartos I, Janosi IM. “Correlation properties of daily temperature anomalies over land”. *Tellus A* 2006;58:593–600.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

LONG-TERM CORRELATIONS OF WIND SPEED IN DIFFERENT REGIONS IN THE STATE OF BAHIA

J. V. Cardoso Santos, prof.vicentecardoso@gmail.com¹

D. M. Moreira, davidson.moreira@fieb.org.br¹

Marcelo A. Moret, mamoret@gmail.com¹

¹ Integrated Campus of Manufacturing and Technology SENAI CIMATEC, Orlando Gomes Avenue, 1845 - Piatã, Salvador - BA, Brazil. Cep.: 41650-010.

Abstract: *This work shows an analysis of time series recorded at different heights in three anemometric towers of 150 m in the state of Bahia, in Esplanada, Mucuri and Mucugê, with the purpose of detecting associated power laws. For this purpose, the DFA (Detrended Fluctuation Analysis) method is used, comparing the actual data with corresponding values simulated in the WRF (Weather Research and Forecasting) model, which evidences the registration of a crossover in the behavior of associated power laws. The analysis of real and simulated data clearly shows correlations with power laws with two distinct scale regions, more markedly in real data and less accentuated in simulated data, in medium and long term horizons.*

Keywords: *Wind speed, DFA, WRF, Power laws.*