



LEIS DE POTÊNCIA NA VELOCIDADE DO VENTO EM ALGUMAS REGIÕES DA BAHIA E NO ARQUIPÉLAGO DE ABROLHOS

¹José Vicente Cardoso Santos (SENAI-CIMATEC) - prof.vicentecardoso@gmail.com;
²Davidson Martins Moreira (SENAI-CIMATEC) - davidson.moreira@fieb.org.br; ³Marcelo A. Moret - moret@fieb.org.br;

Resumo: Considera-se as séries temporais, medidas e também simuladas, da velocidade do vento em diferentes regiões do Estado da Bahia e no Arquipélago de Abrolhos, Brasil e com as mesmas analisa-se a existência de leis de potência associadas através da técnica de DFA (*Detrended Fluctuation Analysis*) e com isto registrar-se potencial geração de energia na matriz eólica. Verifica-se que os dados medidos e simulados mostram correlações com as leis de potência em duas regiões de escalas distintas (subdifusivas e persistentes) em ambas as séries temporais. Sugere-se que isso ocorra devido aos efeitos de mesoescala e às circulações locais atuando na camada limite planetária, onde a turbulência no ciclo diário é gerada pela força térmica (flutuabilidade) e mecânica (cisalhamento do vento).

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

LAWS OF POWER IN THE WIND SPEED IN SOME REGIONS OF BAHIA AND THE ABROLHOS ARCHIPELAGO

Abstract: Consider as a temporary example, a measure and also simulated, once we analyze the existence of associated power laws through the technique of DFA (Floating Analysis Outstanding) and with this is recorder-potential of power generation in the matrix wind. Medieval and simulated databases are correlated with the two instances of trend evaluation (subdiffusive and persistent) in both as temporal pieces. It is suggested that it occurs due to the influence of mesoscale and to the circulations in planes of action of the planetary layer, where the turbulence is generated by the thermal light and the shear of the wind.

Keywords: Wind speed; DFA; Model WRF; Power laws.



1. INTRODUÇÃO

A importância das energias renováveis e o seu aproveitamento como fonte de geração de energia aumenta progressivamente no atual cenário mundial de mudanças climáticas e crise energética [1-2]. Desta forma, entender a dinâmica de variáveis importantes, tal como a evolução temporal da velocidade do vento, a qual está intimamente relacionada com energia eólica e meteorologia, é um assunto de grande interesse [3].

Para extrair a correlação de longo alcance em séries temporais não estacionárias foi desenvolvido o método conhecido como DFA (*Detrended Fluctuation Analysis*) [4]. O método foi aplicado para a análise de DNA e sua evolução [4-5], transições de fase [6], análise de flutuação do raio-X de sistemas astrofísicos [7], entre outros. Com base no exposto, o objetivo deste trabalho é analisar as séries temporais da velocidade do vento em diferentes regiões no estado da Bahia, Brasil, região tropical, nos municípios de Esplanada, Mucuri e Mucugê, para verificar a existência de correlações de longo alcance e leis de potência associadas.

2. METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão de literatura, lastreada em publicações e estudos consolidados sobre a temática nos seus aspectos globais e locais. Além disto tem-se a revisão de literatura de cunho documental e histórico, concomitantemente lastreada em análise de séries temporais (DFA) e com análise comparativa ao predito, na literatura, juntamente com os dados reais e simulados (WRF) no modelo global de simulação. Sobre estes instrumentos metodológicos tem-se as seguintes considerações e procedimentos metodológicos de ações adotadas, a citar:

O DFA é uma forma de análise de flutuações sem tendências que foi proposta [4] para análise de sequências de gênicas e, a partir daí, vem sendo usada como uma técnica para quantificar correlações em séries temporais não estacionárias em diversas aplicações [8-12].

O algoritmo para calcular o DFA integra a série de tempo a ser analisada (com N amostras). Considera-se uma série temporal x_i ($i = 1, 2, \dots, N$) da velocidade do vento horária. O primeiro passo é obter-se os valores de x_i com a relação, onde \bar{x} representa a média aritmética de todos os dados. O segundo passo é construir o perfil do somatório do x_i , onde o perfil é então dividido em $N_s = N/s$ seguimentos, não sobrepostos, de comprimento s . No terceiro passo, a tendência local é determinada usando os mínimos quadrados para cada segmento v . Então, é calculado a diferença entre a tendência local e o seguimento em questão. No fim deste procedimento é obtida uma série temporal corrigida,

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



Se n é o grau do ajuste polinomial tem-se que $F^{(n)}(s)$ representa a função flutuação de diferentes ordens de correção. Se a série original tem correlação de longo alcance, então $F^{(n)}(s)$ aumenta com s de acordo com a lei de potência,

Logo, um gráfico em escalas logarítmicas da flutuação versus s é calculado de forma representar a existência de autossimilaridade α , que quantifica a natureza das correlações da série temporal conforme Tabela 1.

Tabela 1. Valores do expoente de escala e implicações fenomenológicas.

Valores de α	Caracterização	Implicações e desdobramentos
$0 < \alpha < 0.5$	A série apresenta um comportamento antipersistente, ou seja, valores grandes (pequenos) tendem a serem seguidos por valores pequenos (grandes) e desta forma tem-se as séries temporais anti-correlacionadas.	Valores altos são normalmente seguidos por valores baixos e vice-versa.
$\alpha \approx 0.5$	Comporta-se sem memória, apresenta um passeio aleatório, a série original apresenta valor zero para a função de autocorrelação, o que por vezes é denominado de ruído gaussiano branco, caracterizando-se como uma série não correlacionada.	Sinal sem nenhuma correlação. Isso significa que não se pode relacionar o comportamento passado com o comportamento da série no futuro, porque não há memória no processo.
$0.5 < \alpha < 1$	Se $\alpha > 0.5$, o parâmetro de auto-similaridade implica que a série original apresenta correlação de longo alcance, logo valores grandes (pequenos) tendem a serem seguidos por valores grandes (pequenos), ou seja, tem-se a existência de séries temporais correlacionadas de longo alcance, indicando-se uma série persistente.	Valores altos (baixos) são normalmente seguidos por valores altos (baixos).
$\alpha \geq 1$	Para valores mais altos do expoente de correlação de longo alcance ($\alpha \geq 1$) a dinâmica do sistema é caracterizada por ser não estacionário (regime transitório ou condições transitórias).	Os intervalos de variação são: $\alpha < 3/2$, trata-se de um comportamento subdifusivo; para $\alpha = 3/2$ tem-se um comportamento difusivo; para $\alpha > 3/2$ tem-se um sinal superdifusivo.

A aquisição de dados de velocidade do vento foi feita em três torres de monitoramento nos municípios baianos de Esplanada, Mucuri e Mucugê, e em uma estação meteorológica automática no Arquipélado de Abrolhos. As velocidades do vento são adquiridas por quatro anemômetros localizados em alturas diferentes nas torres meteorológicas. O anemômetro, em cada nível, registra uma integralização de medida a cada 10 minutos e médias a cada 60 minutos, em um horizonte de 60 dias nos meses de janeiro e fevereiro de 2016.

O modelo de mesoescala 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 células 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 NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*), FNL (*Final Analysis*), com resolução de 0.25° [14].



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

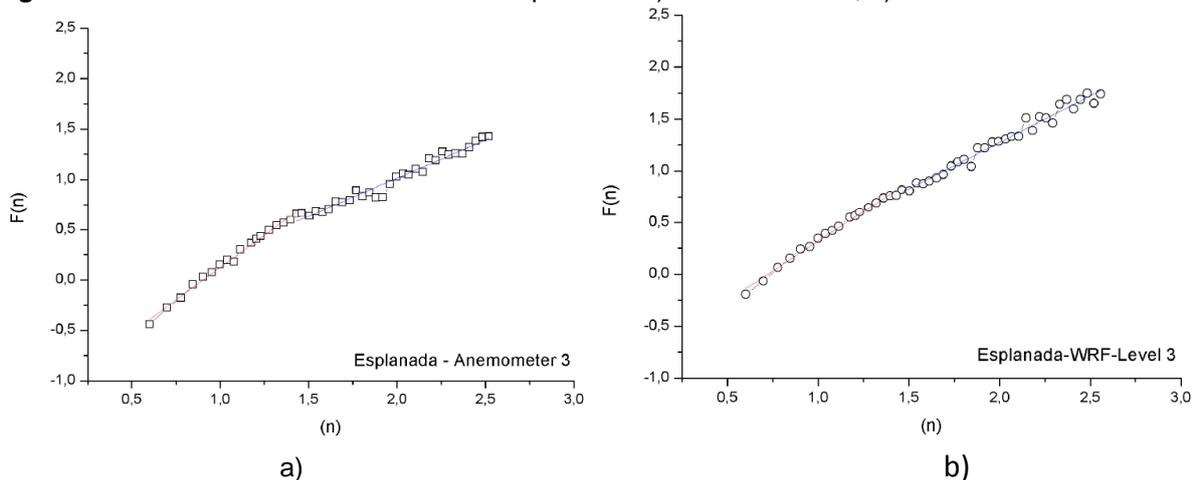
Os dados medidos e simulados foram submetidos à análise de flutuação destendenciada, ou seja, retirada a tendência da série temporal em diferentes escalas, analisando flutuações intrínsecas dos dados. Este fato é registrado com os dados reais bem como com os dados de simulação, conforme verifica-se na Tabela 2, a seguir:

Tabela 2. Localização e elevação das torres anemométricas analisadas

Local	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Elevação do anemômetro (m)			
				I	II	III	IV
Esplanada	11°47'45" S	37°56'42" O	140	80	100	120	150
Mucugê	13°00'18" S	41°22'15" O	984				
Mucuri	18°05'09" S	39°33'03" O	7				
Abrolhos	17°57'46" S	38°42'11" O	21	10			

Além disto, verifica-se também nas Figuras 2, 3 e 4 onde mostrados comparativos de leis de potência registradas nas velocidades dos ventos com dados reais e simulados nas torres de Esplanada, Mucugê e Mucuri, respectivamente, em alturas equivalentes. Por simplicidade, são mostrados resultados somente para o nível 3 (anemômetro em 120 m de altura).

Figura 2. Velocidade do vento na torre de Esplanada: a) dados medidos; b) dados simulados.



Evidencia-se na Tabela 3 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.

Comparando-se os dados reais (I, II, III, IV) com os dados simulados nos 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 (subdifusivo) como reinantes (antes do *crossover*), pois os valores da potência α mostram a existência de correlação com indicativo de sinais



de turbulência.

Figure 3. Velocidade do vento na torre de Mucugê: a) dados medidos; b) dados simulados.

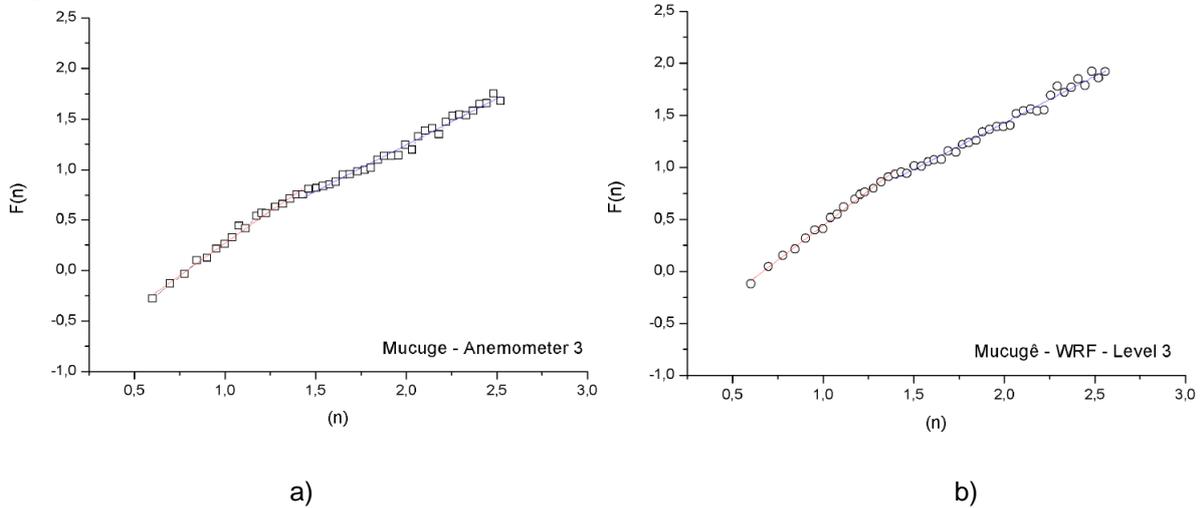
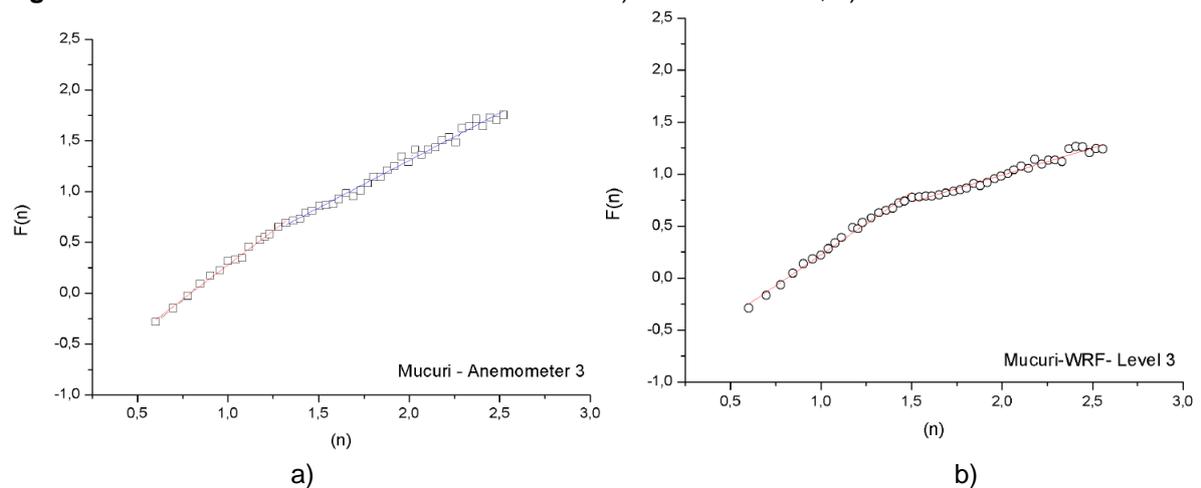


Figure 4. Velocidade do vento na torre de Mucuri: a) dados medidos; b) dados simulados.



Para os dados medidos e simulados do Arquipélago de Abrolhos verificam-se resultados muito semelhantes para ambos, entretanto mostram um caráter subdifusivo, indicando somente os efeitos da turbulência, conforme observa-se na Figura 5.

A Tabela 3 a seguir exibe as oscilações mínimas e máximas da velocidade dos ventos, em todos os níveis analisados.

Table 3. Extremos de velocidades medidas nos anemômetros e simulados pelo modelo WRF.

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.



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

Obs: Os anemômetros das torres anemométricas têm desvio padrão de ± 0.04 para todos os valores de velocidades.

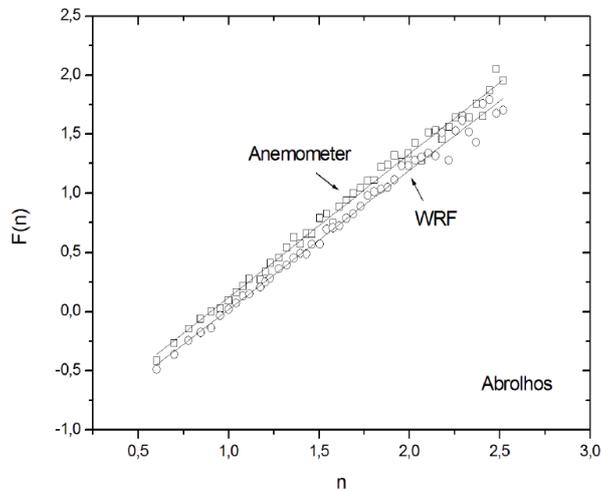
A Tabela 4 mostra a análise do parâmetro α em ajuste dos mínimos quadrados para a verificação com coeficiente (n) em lei de potência associada.

Table 4. Comparativos dos expoentes de escala de dados reais e simulados.

Comparativo dos expoentes de escala antes e depois do crossover (60 dias)																
Local/Dados reais	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
Abrolhos	$\alpha = 1.21$, $\sigma = 0.016$															
Local/Dados 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
Abrolhos	$\alpha = 1.17$, $\sigma = 0.016$															
Obs: α_1 e α_2 são os expoentes da lei de potência para os ajustes lineares e σ_1 e σ_2 os desvios padrões.																

Figure 5. Comparativo de leis de potência na velocidade do vento com média horária em Abrolhos entre dados medidos e dados simulados pelo modelo WRF.

Observa-se também que os valores que indicam o início e fim do *crossover* são de aproximadamente 1.25 a 1.42, o que corresponde aproximadamente a faixa de 18 a 26 h, o que é equivalente aos valores encontrados na literatura [15].



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. Não é observada correlação entre os expoentes de escala e topografia, altitude e distância do mar das torres nos dados medidos e simulados, visto que as correlações foram detectadas em ambos os casos.

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, mantém 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 sua estrutura temporal.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao SENAI CIMATEC, CNPq e FAPESB pelo financiamento e suporte.

5. REFERÊNCIAS

¹ KOÇAK, K., 2009. **Examination of persistence properties of wind speed records using detrended fluctuation analysis**. Energy 34, 1980–1985.

² BLUDSZUWEIT, H. and NAVARRO, J.A.D., 2011. **A probabilistic method for energy storage sizing based on wind power forecast uncertainty**. IEEE Transactions on Power Systems 26(3), 1651-1658.



- ³ JARAMILLO, O.A. and BORJA, M.A., 2004. **Wind speed analysis in La Ventosa, Mexico: a bimodal probability distribution case.** Renewable Energy 29, 1613-1630.
- ⁴ PENG C. K., BULDYREV, S.V., HAVLIN, S., SIMONS, M., STANLEY, H.E. and GOLDBERGER, A. L., 1994. **Mosaic organization of DNA nucleotides.** Physical Review E 49(2), 1685-1989.
- ⁵ STANLEY, H.E., BULDYREV, S.V., GOLDBERGER, A.L., HAVLIN S., PENG C.K. and Simons, M., 1999. **Scaling features of noncoding DNA.** Physica A 273, 1-18.
- ⁶ ZEBENDE, G.F., DA SILVA, M.V.S, ROSA, A.C.P., ALVES, A.S., DE JESUS, J.C.O. and MORET, M.A., 2004. **Studying long-range correlations in a liquid-vapor-phase transition.** Physica A 342, 322-328.
- ⁷ MORET, M.A., 2014. **Self-affinity and nonextensivity of sunspots.** Phys. Lett. A 378, 494-496.
- ⁸ BUNDE, A., HAVLIN, S., KANTELHARDT, J.W., PENZEL, T., PETER, J.H. and VOIGT, K., 2000. **Correlated and uncorrelated regions in heart-rate fluctuations during sleep.** Physical Review Letters 85, 3736–3739.
- ⁹ IVANOV, P., ROSENBLUM, M.G., PENG, C.K., MIETUS, J., HAVLIN, S., STANLEY, H.E. and GOLDBERGER, A.L., 1996. **Scaling behavior of heartbeat intervals obtained by wavelet-based time-series analysis.** Nature 383, 323-327.
- ¹⁰ IVANOV, P.C., YUEN, A., PODOBNIK, B. and LEE, Y.K., 2004. **Common scaling patterns in intertrade times of U.S. stocks** Phys. Rev. E 69, 056107.
- ¹¹ IVANOVA, K. and AUSLOOS, M., 1999. **Application of the detrended fluctuation analysis (DFA) method for describing cloud breaking.** Physica A 274, 349–354.
- ¹² IVANOVA, K., AUSLOS, M., CLOTHIAUX, E.E. and ACKERMAN, T.P., 2000. **Break-up of stratus cloud structure predicted from non-Brownian motion liquid water and brightness temperature fluctuations.** Europhys. Lett. 52, 40-46.
- ¹³ KANTELHARDT, J.W., BUNDE, E.K., REGO, H.H.A. and HAVLIN S., 2001. **Detecting long-range correlations with detrended fluctuation analysis.** Physica A 295, 441–454.
- ¹⁴ KITAGAWA, Y.K.L., NASCIMENTO, E.G.S., SOUZA, N.B.P., AYLAS, G.Y.R., ZUCATELLI, P.J., SALVADOR, N. and MOREIRA, D.M., 2017. **Assessment of the sensitivity of the WRF model using different PBL schemes over the Metropolitan Region of Salvador.** XXXVIII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, CILAMCE2017. Florianopolis, Brazil. doi:10.20906/CPS/CILAMCE2017-0647.
- ¹⁵ SANTOS, M.O., STOSIC, T. and STOSIC, B.D., 2012. **Long-term correlations in hourly wind speed records in Pernambuco, Brazil.** Physica A 391, 1546–1552.