

## CORRELAÇÕES DE LONGO ALCANCE NA VELOCIDADE DO VENTO EM SALVADOR-BA E GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

José Vicente Cardoso Santos (Doutorando - MCTI), prof.vicentecardoso@gmail.com<

Davidson Martins Moreira (Orientador - MCTI), davidson.moreira@fieb.org.br<

Marcelo A. Moret S. Gonçalves (CoOrientador - MCTI), mamoret@gmail.com<

Faculdade SENAI CIMATEC

Palavras Chave: Fontes Renováveis, DFA, Complexidade, Energia Eólica.

### Introdução

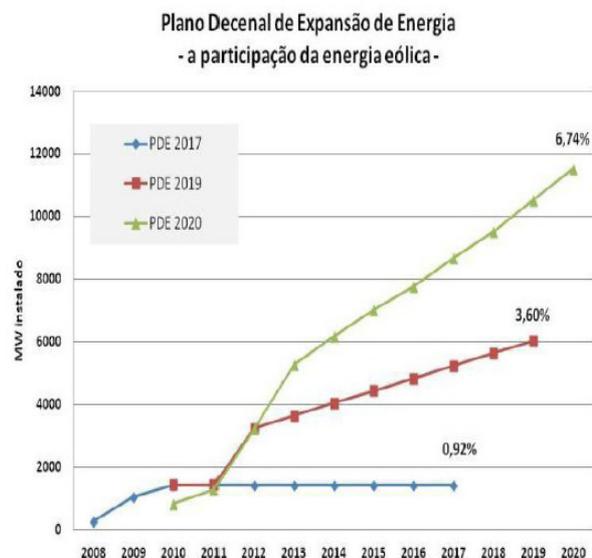
Considera-se que o Brasil tem um alto potencial de geração de energia eólica e o mesmo ainda está em fase embrionária de exploração, pois, de acordo com o preconizado no Balanço Energético Nacional de 2014, onde, menos de 2% da energia gerada no país tem origem da energia eólica, e parte da potência gerada ainda precisa ser devidamente distribuída e comercializada [1], e, não obstante a isto, verifica-se também que o potencial eólico brasileiro, segundo as mesmas fontes, chega a 144 GW, o que representa mais de 15% do total da potencia atual instalada, com fortes tendências ao crescimento devido a crise energética que se avizinha. [1].

Este cenário representa um grande setor na sua matriz inicial de crescimento e um potencial promissor de expansão e desdobramentos na geração de empregos e renda, consolidando assim um setor em franca expansão, conforme verifica-se na figura 1.

Para consolidar-se a viabilidade do setor e da sua expansão é fundamental que as unidades de geração de energia tenham o seu funcionamento viabilizado economicamente e para tal o seu funcionamento deve ser contínuo, eficaz e eficiente. Esta continuidade é fundamental, pois, quando refere-se a geração de energia, não deve haver processo interrompido, visto que a demanda é contínua e não há como armazená-la de forma eficiente. Estas condições demandam de pertinência das correntes e da direção do vento [2], bem como de valores modulares da velocidade em patamares que proporcionem os movimentos das pás geradoras e que não provoquem o seu desgaste de forma rápida, ou seja, torna-se fundamental um vento contínuo e não necessariamente em alta velocidade. Desta maneira as características do processo de geração de energia eólica estão diretamente relacionadas com as características do regime intermitente do vento local [3].

Modelos baseados nos processos estocásticos [3], têm sido propostos para explicar a distribuição da velocidade do vento, a exemplo os modelos de

distribuição de Burr, Gamma, Rayleigh, Weibull, Lognormal e distribuição de Gauss etc, entretanto estas propostas de modelagem apresentam limitações devido ao fato de que estes modelos são susceptíveis aos efeitos de não-estacionaridade, a



Fonte: (BRASIL, 2013).

Figura 1 - Plano decenal de demanda da expansão de energia eólica.

exemplo das tendências, que são um conjunto de componentes cuja frequência tenha período maior do que o comprimento total da própria série [4], de forma que, a existência de uma tendência em uma série temporal desdobra-se no fato dos respectivos dados tornarem-se não estacionários bem como a incompletude destes métodos em detectar o processo de multifractalidade, ou seja, a incompletude no registro das mudanças no regime dos ventos.

Com este cenário de incompletudes tem-se que a análise de flutuação destendenciada (*Destrended Flutuação Analysis - DFA*), que é um método originário do aperfeiçoamento do método

denominado *Fluctuation Analysis* (FA), sendo que o DFA elimina a tendência da série temporal em diferentes escalas, analisando flutuações intrínsecas dos dados [5], de forma que, o DFA tem sido uma proposta de modelagem com razoável sucesso e eficácia na sua aplicação, de forma que o objetivo geral deste artigo é o registro de resultados preliminares das séries temporais que representam os registros de intensidade, direção e incremento da direção do vento em unidade fixa de coleta de dados na unidade do SENAI CIMATEC em Salvador-Ba, com o uso do método *Detrended Fluctuation Analysis* (DFA) com fins de determinação da persistência da série como fator de relevância para a viabilidade da respectiva instalação local dos geradores eólicos; e, como objetivos específicos tem-se a criação de índices de persistência das séries históricas locais (velocidade, pressão, temperatura etc), e, modelar mais um algoritmo de análise de viabilidade na instalação de geradores eólicos.

Para consolidar estes objetivos utiliza-se uma revisão de literatura, de cunho documental, histórico e quali-quantitativo com lastro na pesquisa bibliográfica atualizada sobre o tema e afins e com o uso dos dados coletados na unidade do SENAI CIMATEC em Salvador-Ba.

## Revisão de Literatura

As séries temporais são definidas como sendo o conjunto de dados que são coletados, geralmente, em intervalos regulares de tempo e que diferenciam-se dos dados coletados aleatoriamente devido ao fato de representarem a evolução temporal da sequência da dinâmica de uma determinada variável específica. No caso em análise trata-se da velocidade do vento, onde tem-se o ordenamento linear desta série de forma cronológica [6]. A análise é feita com vistas a identificar se em uma determinada série, ou a sua sequência de dados, existe ou não correlação entre eles [7]. Esta eventual correlação é denominada de efeito de memória de longa duração ao longo da variável independente da série, ou seja, no decorrer do tempo, de forma que as suas propriedades possam ser investigadas utilizando-se de conceitos e métodos da teoria fractal<sup>1</sup> de maneira que este estudo de flutuações no tempo permite intuir autossimilaridades de maneira

<sup>1</sup> Fractal ou Fractais (do latim *fractus*, fração, quebrado) são figuras da geometria não-Euclidiana que podem ser divididas em partes, cada uma das quais semelhante ao objeto original são geralmente autossimilares e independem de escala, tal qual verifica-se nas séries temporais em análise. O termo foi criado em 1975 por Benoît Mandelbrot, matemático francês nascido na Polónia, que descobriu a geometria fractal na década de 70 do século XX. Em 1872, Karl Weierstrass encontrou o exemplo de uma função com a propriedade de ser contínua em todo seu domínio, mas em nenhuma parte diferenciável. O gráfico desta função é chamado atualmente de fractal.

que não podem ser investigados utilizando-se de uma única escala de medida absoluta [6].

Segundo o que preconiza [8] e [7], vários

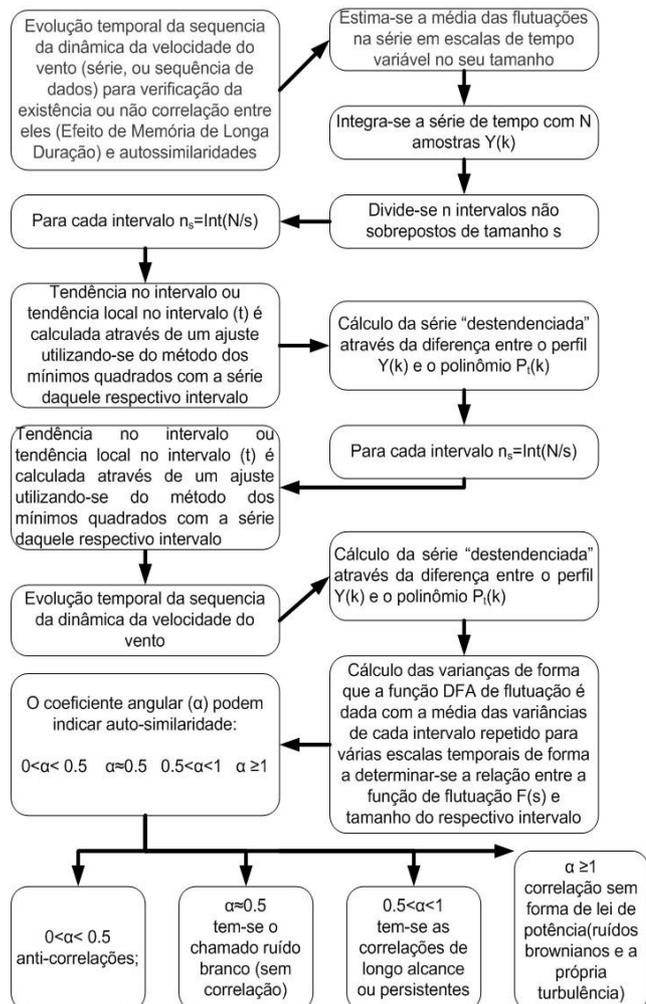


Figura 2 - Algoritmo de execução do tratamento dos dados.

Fonte: registros dos próprios autores.

modelos utilizam-se de técnicas diversas para elucidar a identificação de possíveis correlações de longo alcance em séries temporais, entretanto o método atualmente mais utilizado para esse estudo é o *Detrended Fluctuation Analysis* [9].

Com isto utiliza-se de uma metodologia onde busca-se estimar a média das flutuações na série em escalas de tempo variável no seu tamanho, e, com isto verifica-se como estas flutuações dependem da escala em análise. Espera-se que a função de flutuação apresente um comportamento do tipo lei de potência de forma que a variação temporal para uma dada série passa a indicar a existência de flutuações não estacionárias, representando um processo multifractal [9].

Atualmente, a análise multifractal tem apresentado considerável eficácia em diversas

áreas do conhecimento humano, a exemplo das séries temporais para indicadores econômicos [10], ciências da vida [9], meteorologia [11] e [12] dentre outras áreas, a exemplo desta proposta de pesquisa, onde pretende-se proceder análise estatística desta série numérica e utilizar-se do método *Detrended Fluctuation Analysis* (DFA) para o tratamento e eventual fractalização destes dados.

Desta maneira o uso do método DFA é indicado, conforme verifica-se na figura 2 ao lado, quando deseja-se mensurar correlações de longo alcance nas séries numéricas [9] e baseia-se na análise de flutuações dos dados após retirar-se a tendência da série temporal integrada, ou seja, obtêm-se uma série integrada que é dividida em intervalos independente [5]. Uma outra forma de abordagem é a consideração de intervalos não sobrepostos nos seus tamanhos, de forma que, em cada intervalo, é retirada a tendência local através do ajuste polinomial (linear, quadrático ou em outros graus de expoente) repetidas vezes em um processo iterativo em escala através de uma lei de potência com um expoente específico que pode ser calculado através de código fonte disponível em fórum *on-line*<sup>1</sup> ou deduzível algoritmicamente e implementável em software específico [13].

Assim, o processo algorítmico para o cálculo do DFA consiste em integrar a série de tempo com N amostras, considerar-se a série temporal integrada  $Y(k)$  dividindo-a n intervalos não sobrepostos de tamanho s onde para cada intervalo  $n_s = \text{Int}(N/s)^6$  e a tendência no intervalo ou tendência local no intervalo (t) é calculada através de um ajuste utilizando-se do método dos mínimos quadrados com a série daquele respectivo intervalo, ou seja, com o cálculo da série “destendenciada” através da diferença entre o perfil  $Y(k)$  e o polinômio  $P_s(k)$ . Deve-se registrar que os ajustes de polinômios de primeira ordem obtem-se o DFA de primeira ordem, e ajustes de polinômios de ordem k, tem-se o DFA de ordem k também determinado. Em todos os casos as variâncias podem ser calculadas de forma que a função DFA de flutuação é determinada com a média das variâncias de cada intervalo de forma que este procedimento pode ser repetido para várias escalas temporais de forma a determinar-se a relação entre a função de flutuação  $F(s)$  e tamanho do respectivo intervalo. Posteriormente um análise logarítmica entre a função flutuação  $F(s)$  e o próprio s pode ser analisada de maneira a determinar-se uma relação linear neste gráfico onde o seu coeficiente angular (R) podem indicar auto-

similaridade, ou seja, para valores de  $0 < R < 0.5$  tem-se o que determinado como sendo anti-correlações;  $R \approx 0.5$  tem-se o chamado ruído branco, ou seja, um sinal sem nenhuma correlação; para valores  $0.5 < R < 1$  tem-se as correlações de longo alcance ou persistentes e que indicam tendências, que, no caso dos ventos, é um forte indicador de eficácia nos elementos geradores de energia, pois, existirá a persistência ou continuidade na geração bem como velocidades mais facilmente previsíveis; e, finalmente, para  $R \geq 1$  tem-se uma correlação mas sem ser na forma da lei de potência (a exemplo dos ruídos brownianos e a própria turbulência, que não seria uma solução eficaz para o geradores elóicos, pois aumentam sobremaneira os riscos de aceleração da deteriorização da maquina geradora) [5].

## Dados e Discussão

Nas pesquisas preliminares com os dados da estação experimental do SENAI CIMATEC, Salvador, Bahia (Quadro 1), tem-se uma análise preliminar com ajuste dos valores extremos locais da velocidade do vento, sem análises de outras grandezas correlacionadas (temperatura, pressão etc), e, sem o trato de homogeneidade de dados da própria série e com ajuste de primeira ordem da mesma, ou seja, com um ajuste linear, tal qual proposto pelo método em análise, pode-se verificar a necessidade de filtragens na própria série para a retirada de valores referentes a eventuais inconformidades na mesma, ou seja, a existência de ventos fortes (rajadas de vento), distúrbios locais etc, que, em uma segunda análise, pode ter os seus valores modulares, em patamares definidos localmente. Não obstante a isto, registra-se que já foram consolidados os cálculos da função de flutuação para tamanhos de específicos da série e que os mesmos variavam de 3 a n/4, onde n era a quantidade de dados amostrados e o uso de software desenvolvido na linguagem C com implementação do algoritmo anteriormente descrito e com a modelagem em primeira ordem polinomial em ajustes respectivos. A amostra da coleta de dados nos fornece o seguinte layout de dados, a citar:

Nesta análise preliminar tem-se o trato da série temporal para que a mesma reflita o seu valor absoluto e direção modularizada de forma que os cálculos dos valores de DFA estão sendo feitos de forma direta conforme verifica-se, na figura 3, que o

Quadro 1: Amostra de dados em coleta da estação de medição do SENAI/CIMATEC/Salvador-Ba

Amostra	Temp	Hi	Low	Out	Dew	Wind	Wind	Wind	Hi	Hi	Wind	Heat	THW	THSW		Rain	Solar	Solar	HiSolar	UV	UV	Hi	Heat	Cool	In	In	In	In	Wind	Wind	ISS	Arc.			
Date	Time	Out	Temp	Temp	Hum	Pt.	Speed	Dir	Run	Speed	Dir	Chill	Index	Index	Index	Bar	Rain	Rate	Rad.	Energy	Rad.	Index	Dose	UV	D-D	D-D	Temp	Hum	Dew	Heat	ET	Samp	Tx	Receipt	Int.
16/08/2010	15:00	26,4	26,6	26,2	70	20,5	2,20	S	4,02	6,3	SSE	26,4	27,8	27,8	35,5	762	0	0	571	24,56	599	3,5	0,75	3,9	0	0,168	24,9	51	14,1	24,9	0,41	383	1	56	30
16/08/2010	15:30	26,2	26,3	26	69	20	2,20	S	4,02	6,7	SE	26,2	27,4	27,4	33,9	762	0	0	408	17,55	617	2,3	0,49	3,2	0	0,163	24,8	55	15,1	24,9	0	701	1	100	30
16/08/2010	16:00	26,1	26,4	25,6	72	20,7	2,70	SSE	4,83	8	S	26,1	27,6	27,6	33,6	762,2	0	0	318	13,68	577	1,4	0,3	2	0	0,162	24,6	50	13,4	24,6	0,28	701	1	100	30
16/08/2010	16:30	24,9	25,6	24,2	81	21,4	3,60	S	6,44	10,7	SSE	24,6	26,6	26,3	26,7	762,5	0	0	118	5,07	269	0,3	0,06	0,7	0	0,137	24,3	60	16	24,7	0	698	1	100	30
16/08/2010	17:00	23,9	24,2	23,7	83	20,8	3,60	S	6,44	9,8	SSE	23,6	25,4	25,2	25,2	762,7	0	0	100	4,3	193	0	0	0,5	0	0,116	25,3	66	18,5	26,2	0,1	701	1	100	30
16/08/2010	17:30	23,4	23,7	22,7	85	20,7	3,60	S	6,44	10,3	SE	23,1	24,7	24,4	23,7	762,9	0	0	35	1,51	62	0	0	0	0	0,105	25,9	70	20	27,1	0	689	1	100	30
16/08/2010	18:00	22,6	22,7	22,5	87	20,3	3,10	S	5,63	8,5	SSE	22,6	23,8	23,8	22,7	763,2	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0,089	26	71	20,3	27,3	0,05	680	1	99,4	30
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Fonte: registros dos próprios autores.

coeficiente de escala global, em um primeiro momento, ajuste em cor vermelha, ficou no intervalo entre 0,5 e 1, ( $R=0,82\pm 0,02$ ), e em outra faixa de análise, ajuste em cor azul, ( $R=0,37\pm 0,01$ ), indicando que existe uma correlação de longo alcance persistente com e sem ruído, e, quando se analisa todo o conjunto de dados, ou seja, registra-se um possível ruído browniano, não obstante, os dados quando tratados tem-se o mesmo coeficiente abaixo da unidade e superior a metade da mesma, ou seja, velocidades altas/baixas de vento são seguidas por velocidades altas/baixas, corroborando os resultados de outros autores e com isto pode-se considerar este cenário como mais um dos fatores determinantes (pois existem outros: geográficos, sociais, econômicos etc), que determinem que a região em análise pode permitir a instalação de parques eólicos bem como a viabilidade do uso dos mesmos.

### Comentários Finais e Recomendações

Verificou-se assim que o método DFA confirma a existência de correlação de longo alcance nas séries estudadas, tal qual preconizam diversos autores em localidades litorâneas do Brasil, e,

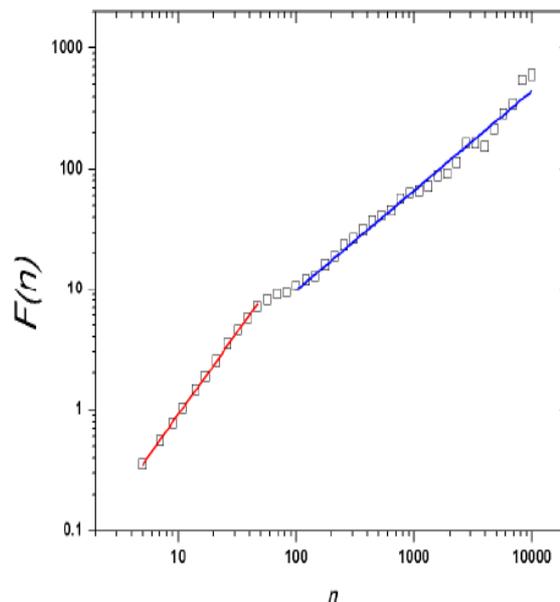
Figura 3 - Ajustes finais para verificação das eventuais leis de potência em duas fases de análise (vermelho, ( $R=0,82\pm 0,02$ ), e  $R_N("6EW(")$  azul).

ressalta-se ainda que a literatura recente demonstra que as séries de velocidade de vento apresentam persistência maior do que as séries de direção do vento.

Deve-se também considerar que existem estações de coleta que apresentam-se em diferentes regimes e, para intervalos maiores do que os utilizados neste trabalho, de forma que neste momento não é possível concluir que as séries apresentavam correlações de longo alcance persistentes. Não obstante, no tratamento dos dados, o aumento da ordem de ajustes e o ajuste dos intervalos menores que 30 horas (em média a sazonalidade da maré local), já apresentam uma série de ruídos brownianos.

Portanto, de forma geral, espera-se a existência de uma sequência de dados correlacionados. O método DFA mostra-se como uma ferramenta promissora para ser utilizada na indicação da existência de correlações em uma série temporal da velocidade do vento, no sentido de prever os seus pontos de maximização e minimização além de funções de flutuação temporais.

### Referências



Fonte: Registro dos próprios autores.

<sup>1</sup> 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\\_2015\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2015_Web.pdf). Acesso em 5 Jun. 2015.

<sup>2</sup> VAREJÃO-SILVA, M. A. Meteorologia e Climatologia. 2ª Ed. ed. Brasília/DF: INMET, 2001. p. 532. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE. 1974.

<sup>3</sup> 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.

<sup>4</sup> 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.

<sup>5</sup> 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.

<sup>6</sup> MORET, M. A.; SENNA, V. de; ZEBENDE, G. F.; VAVELIUK, P. X-ray binary systems and nonextensivity. Physica A. 389: 854-858, 2010.

<sup>7</sup> ADDISON, Paul S. Fractals and Chaos: An Illustrated Course. 1ª. Ed. London, CRC Press, 1997.

<sup>8</sup> MANDELBROT, B. The Fractal Geometry of Nature. New York: W.H. Freeman and Company. 1983.

<sup>9</sup> PENG, C-K. et. al. Mosaic organization of DNA nucleotides. Physical Review E, v. 49, n. 2, pp. 1685-1989, 1994.

<sup>10</sup> KANTELHARDT, J.W. et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series. Physica A, Amsterdam, v. 316, p. 87-114, 2002.

<sup>11</sup> SHUKLA, J. Predictability in the Midst of Chaos: A scientific basis for climate forecasting. Science, Washington, D.C., 1998.

<sup>12</sup> SUTTON, R.T.; ALLEN, M.R. Decadal predictability of North Atlantic sea surface temperature and climate. Nature, London, v. 388, p. 563-567, 1997.

<sup>13</sup> KAVASSERI R. G.; NAGARAJAN R. A multifractal description of wind speed records. Chaos, Solitons & Fractals, v. 24, p. 165, 2005.