



**Série e Transformada de Fourier Aplicadas no Preenchimento de Falhas de Séries Temporais de Intensidade do Vento na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, Rio de Janeiro – Brasil**  
Fourier Series and Transform Applied to Gap Filling of Wind Intensity Time Series from Almirante Álvaro Alberto Nuclear Plant, Rio de Janeiro - Brazil

Rafael H. O. Rangel<sup>1</sup>; José Francisco de Oliveira-Júnior<sup>2</sup>;  
Audálio R. Torres Júnior<sup>3</sup>; Luiz Cláudio Gomes Pimentel<sup>4</sup> & Givanildo de Gois<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia (LAMCE), Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Centro de Tecnologia, I-214, Cidade Universitária, 21941-909, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>2</sup> Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro dos Martins, 57072-900, Maceió, AL, Brasil

<sup>3</sup> Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Oceanografia e Limnologia, Laboratório de Hidrodinâmica Costeira, Estuarina e de Águas Interiores (Lhiceai), Av. dos Portugueses, 1966, Cidade Universitária Dom Delgado, 65085-580, Bacanga, São Luís, MA, Brasil

<sup>4</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Meteorologia, Rua Athos da Silveira Ramos, G1-274, Cidade Universitária, 21941-916, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>5</sup> Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica, Av. dos Trabalhadores n.º420, Vila Santa Cecília, 27255-125, Volta Redonda, RJ, Brasil

E-mails: [rangel@lamce.coppe.ufrj.br](mailto:rangel@lamce.coppe.ufrj.br); [joliveirajunior@gmail.com](mailto:joliveirajunior@gmail.com);  
[audalio.torres@gmail.com](mailto:audalio.torres@gmail.com); [pimentel65@gmail.com](mailto:pimentel65@gmail.com); [givanildogois@gmail.com](mailto:givanildogois@gmail.com)

Recebido em: 09/10/2017 Aprovado em: 29/06/2018

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2018\\_2\\_74\\_84](http://dx.doi.org/10.11137/2018_2_74_84)

## Resumo

Neste trabalho é proposta uma metodologia, com base nas Séries de Fourier e Transformada de Fourier, como técnica de preenchimento de falhas em uma série temporal de intensidade do vento de uma torre meteorológica localizada na Central Nuclear Almirante Alvaro Alberto (CNAAA), Rio de Janeiro – Brasil. A série temporal compreende o período de 1982-2001, sendo escolhidos três períodos sem falhas. Os períodos foram de julho/1988 a setembro/1988, de outubro/1988 a dezembro/1988 e setembro/1999 a maio/2000. As séries foram decompostas vetorialmente em componente zonal e meridional, em seguida foram geradas falhas artificiais. As Séries de Fourier foram utilizadas e, posteriormente foram calculados os coeficientes da Transformada de Fourier. Os limites de corte foram escolhidos para cada espectro de cada componente do vento. Os novos coeficientes foram aplicados na Transformada Inversa de Fourier para os horários das falhas, gerando valores previstos das componentes vetoriais do vento, para preencher as falhas artificiais. As previsões foram multiplicadas por fatores de ganho para que sua intensidade fosse melhor ajustada. Os três períodos foram avaliados visualmente e estatisticamente, baseados no modelo de regressão linear (MLR), coeficiente de correlação linear ( $r$ ), ajustamento de curvas, erro padrão de estimativa (EPE,  $m.s^{-1}$ ), o índice de concordância ( $r^2$ ), índice de concordância de Willmot e o índice de confiança ( $c$ ). A análise visual das reconstruções das séries indica que o método reproduz as intensidades do vento de maneira razoavelmente satisfatória. Apesar disso, a análise estatística do índice ( $c$ ), no geral, mostrou um desempenho de sofrível a péssimo das componentes do vento nos três períodos, podendo ser devido à diferença de fase demonstrada nas reconstruções. A metodologia pode ser aplicada, com ressalvas, para as demais torres existentes na CNAAA, apenas sendo restritiva a condição de transição do regime de escoamento entre a circulação da brisa marítima e vento catabático, seguido do fator de ganho para séries temporais maiores.

**Palavras-chave:** séries temporais; variável meteorológica; modelo matemático; falha de dados

## Abstract

In this work is proposed a methodology, based on the Fourier Series and Fourier Transform, as a gap filling technique in a time series of wind intensity from a meteorological tower located at Almirante Alvaro Alberto Nuclear Power Plant (CNAAA), Rio de Janeiro - Brazil. The time series comprises the period 1982-2001, with three periods without gaps. The periods ranged from July/1988 to September/1988, from October/1988 to December/1988 and from September/1999 to May/2000. The series were vectorially decomposed into zonal and meridional components, after which artificial gaps were generated. The Fourier series were used and later the coefficients of the Fourier transform were calculated. The cut limits were chosen for each spectrum of each component of the wind. The new coefficients were applied in the Inverse Fourier Transform for the fault times, generating predicted values of the vector wind components, to fill the artificial gaps. The forecasts were multiplied by gain factors so that their intensity was better adjusted. The three periods were statistically evaluated based on the linear regression model (MLR), linear correlation coefficient ( $r$ ), curve fitting, standard error of estimation (EPE,  $ms^{-1}$ ), concordance index ( $r^2$ ) and index of Willmot's agreement and confidence index ( $c$ ). The visual analysis of series reconstructions indicates that the method reproduces the wind intensities in a reasonably satisfactory way. In spite of this, the statistical analysis of index ( $c$ ), in general, showed a poor performance of the wind components in the three periods, and may be due to the phase difference demonstrated in the reconstructions. The methodology can be applied, with caveats, to the other existing towers in the CNAAA, only being restricted the condition of transition of the flow regime between sea breeze circulation and katatic wind, followed by the gain factor for larger time series.

**Keywords:** time series, meteorological variable, mathematical model, data failure

## 1 Introdução

Desde seu início, as pesquisas nucleares têm se preocupado com a avaliação de segurança que, em caso de eventuais acidentes ou atividades rotineiras, podem liberar partículas radioativas na atmosfera. Tais partículas podem ser transportadas e afetar áreas distantes em relação a uma Central Nuclear, dependendo da intensidade e direção do vento e da quantidade de material liberado, além das condições meteorológicas locais e topografia (Oliveira Júnior *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2017). Recentemente houve um acidente envolvendo a central de Fukushima Daiichi, no Nordeste (NE) do Japão, com liberação de material radioativo (Yasunari *et al.*, 2011).

No Brasil, as usinas Angra I e II estão inseridas na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) e uma terceira unidade está em construção, localizada entre o Oceano Atlântico e as Serras do Mar e da Mantiqueira, na praia de Itaorna, Angra dos Reis – Rio de Janeiro, região Sudeste. O local cujo comportamento da atmosfera é influenciado por uma série de sistemas meteorológicos de várias escalas como, por exemplo, os sistemas de mesoescala (circulações de brisas marítima/terrestre e vale/montanha), sistemas sinóticos (Sistemas Frontais - SF, Bloqueios Atmosféricos - BA e Alta Subtropical do Atlântico Sul - ASAS) e locais (efeitos de não-homogeneidade do terreno) (Oliveira Júnior & Pimentel, 2009; Oliveira Júnior *et al.* 2010).

Devido aos riscos inerentes à operação de usinas nucleares, o conhecimento prévio de padrões de vento e sua previsão são de grande importância na atividade rotineira de monitoramento e planejamento de emergências (Aguiar *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2017). Há muita dificuldade em se obter séries temporais consistentes, longas e, principalmente, sem falhas. Segundo Beaulieu *et al.* (2007), modificações das condições nas quais uma estação meteorológica opera, tais como, mudança de local, troca ou manutenção de instrumentos, podem introduzir descontinuidades artificiais nos dados que não refletem variações reais do tempo e clima locais. De forma geral, devido à variação espacial e temporal da disponibilidade de medidas de variáveis meteorológicas, os dados são geralmente incompletos. En-

tretanto, apenas excluir da análise as variáveis com apenas alguns valores ausentes pode levar a subutilização dos dados disponíveis (Schneider, 2001). Além disso, segundo Eischeid *et al.* (2000), existe grande demanda na comunidade científica por séries temporais completas que tenham passado por algum tipo de controle de qualidade.

Os conjuntos de dados completos e confiáveis são necessários tanto para estudos observacionais utilizando as próprias séries temporais quanto de modelagem atmosférica, entre outros, que podem dar suporte à tomada de decisões.

As técnicas de preenchimento de falhas existentes na literatura são aplicadas em séries incompletas de dados meteorológicos principalmente de temperatura do ar, radiação solar e chuva, provenientes de estações meteorológicas convencionais e automáticas (Brito *et al.*, 2016; Lyra *et al.*, 2016; Lyra *et al.*, 2017), não havendo na literatura, entretanto, trabalhos que utilizem séries de dados de vento provenientes de Centrais Nucleares, principalmente em regiões onde coexistam cadeia montanhosa, proximidade do ambiente costeiro e uma série de fenômenos acoplados, como é o caso da CNAAA (Oliveira Júnior & Pimentel, 2009; Oliveira Júnior *et al.* 2010).

Kemp *et al.* (1983) e Eischeid *et al.* (2000), aplicaram diferentes métodos para preenchimento de falhas de séries temporais de variáveis meteorológicas, tais como chuva, radiação solar e temperatura do ar. No entanto, são raros os trabalhos sobre preenchimento de falhas de séries temporais de intensidade e direção do vento (Kline & Milligan, 1998). Eischeid *et al.* (2000) analisaram seis métodos matemáticos de interpolação espacial (Normal Raio Method, Inverse Distance Method, Optimal Interpolation, Multiple Regression, Single Best Estimator e Median) para criar uma série completa de dados de temperatura do ar e chuva diária entre 1951 e 1991 para estados a oeste do Rio Mississipi – EUA. O método Multiple Regression foi considerado o melhor estimador. Enquanto, Kline & Milligan (1998) compararam três diferentes métodos matemáticos (Markov Transition Matrix, Trend Method e Lag-1 Autorregressive Markov Chain) em séries de dados

de vento, sendo a Lag-1 Autorregressive Markov Chain a técnica mais precisa e de maior consistência. Tardivo & Berti (2012) empregaram um método dinâmico baseado em regressões lineares múltiplas que utiliza estações vizinhas para preencher falhas de dados de série de temperatura para a região de Veneto, na Itália.

Kemp *et al.* (1983) separa os métodos de preenchimento de falhas em dois grupos: between-station, que utilizam dados de estações vizinhas e within-station, que utiliza os dados apenas da própria estação. A metodologia proposta neste trabalho se encaixa no primeiro grupo nomeado por Kemp *et al.* (1983). Atkinson & Lee (1992) desenvolveram procedimentos para o Environmental Protection Agency (EPA) para preenchimento de falhas de dados horários do National Climatic Data Center (NCDC) por meio da análise objetiva quando a falha for correspondente a apenas uma hora de dados e análise subjetiva de duas ou mais horas de falha são encontradas.

Séries e transformadas de Fourier são historicamente utilizadas em diversas áreas da ciência. Nas Ciências Atmosféricas são normalmente encontrados trabalhos que utilizam a análise de Fourier para gerar funções dependentes do tempo de variáveis meteorológicas cujo comportamento é periódico, como radiação solar e temperatura máxima e mínima (Salcedo & Baldasano, 1984; Baldasano *et al.* 1988; Dorvlo, 2000) em que se podem ter os valores das variáveis em qualquer período de tempo desejado.

A disponibilidade de séries temporais de dados meteorológicos desprovidas de falhas e que englobem um grande período de tempo para utilização no monitoramento da central nuclear é fundamental. Neste cenário, é importante a elaboração de uma nova metodologia a ser aplicada para preenchimento de falhas em séries de dados de vento de torre meteorológica localizada na CNAAA. Portanto, o objetivo é propor uma metodologia utilizando Séries e Transformadas de Fourier como técnica de interpolação para preenchimento de falhas em séries temporais de intensidade do vento, provenientes de torre meteorológica existente na CNAAA, Rio de Janeiro – Brasil.

## 2 Materiais e Métodos

### 2.1 Área de Estudo

A área de estudo é a região de Angra dos Reis, localizada no litoral sul do Estado do Rio de Janeiro, região Sudeste do Brasil, mais precisamente na CNAAA (23,01°S de latitude e 44,46°W de longitude) – (Figura 1). A região de Angra dos Reis está localizada na região litorânea entre a Baía de Ilha Grande e a Serra do Mar, onde a circulação atmosférica local é afetada pela topografia complexa, interação oceano-continente e a atuação de sistemas de mesoescala e sinóticos (Leão & Pereira, 1998; Nicoli, 1986; Oliveira Júnior & Pimentel, 2009). Na costa sudeste do Brasil, geralmente, ventos de quadrante Sul estão associados a passagem de sistemas meteorológicos e os de Norte às condições mais estáveis (Satyamurty *et al.*, 1998), sendo que os SF alteram a direção do vento para Sudoeste, Sul e Sudeste (Rocha & Gandu, 1996).



Figura 1 Mapa do Estado do Rio de Janeiro, com destaque para a cidade de Angra dos Reis em vermelho. A estrela amarela demarca a localização da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA).

### 2.2 Série de Dados e Falhas Artificiais

Foram utilizados dados horários da intensidade do vento de uma torre meteorológica da CNAAA com anemômetro a 10 m de altura, a série temporal compreende 1982 a 2001. Desta série, foram escolhidos três períodos ( $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ ) sem falhas, sendo posteriormente geradas falhas artificiais removendo-

-se aproximadamente os últimos 10% de dados de cada período (Tabela 1). Pois, em geral, as técnicas de preenchimento de falhas são aplicadas em séries nas quais são geradas falhas propositalmente por meio da exclusão arbitrária de valores ao longo da série temporal e posterior aplicação de métodos estatísticos para a comparação com a série original.

Períodos	Início	Fim	Quantidade de Horas	Quantidade de Falhas Artificiais
P <sub>1</sub>	30/07/1988 - 14 h	20/09/1988 - 14 h	1249	125
P <sub>2</sub>	19/10/1988 - 24 h	19/12/1988 - 08 h	1449	149
P <sub>3</sub>	24/09/1999 - 11 h	31/05/2000 - 24 h	6014	614

Para a análise das séries temporais de vento foi necessária a decomposição vetorial, das componentes do vento em  $u$  e  $v$  ( $m.s^{-1}$ ), de acordo com as Eqs. 1 e 2.

$$u = - \operatorname{sen} \left( \text{direção} \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot \text{velocidade} \quad (1)$$

$$v = - \operatorname{cos} \left( \text{direção} \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot \text{velocidade} \quad (2)$$

### 2.3 Transformada Discreta e Transformada Inversa de Fourier

As séries de Fourier podem ser calculadas pela forma complexa ou pela forma trigonométrica. Porém, no desenvolvimento da metodologia, foi necessária a utilização da forma trigonométrica e discretizada, sendo descrita por Wilks (2005). O método envolve somas de contribuições de senos e cossenos, multiplicados por amplitudes. Os coeficientes e a Transformada Discreta de Fourier (TDF) são calculados de acordo com as Eqs. 3, 4 e 5, e a Transformada Inversa de Fourier (TIF) pela Eq. 6. As frequências são calculadas pela Eq. 7. Todas as equações estão listadas abaixo:

$$A_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \cos \left( \frac{2\pi k t}{n} \right) \quad (3)$$

$$B_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi k t}{n} \right) \quad (4)$$

$$C_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \quad (5)$$

$$Y_t = \bar{y} + \sum_{k=1}^{\frac{n}{2}} \left[ A_k \cos \left( \frac{2\pi k t}{n} \right) + B_k \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi k t}{n} \right) \right] \quad (6)$$

$$f_k = \frac{k}{n} \quad (7)$$

em que,  $A$  e  $B$  são os coeficientes de Fourier,  $C$  é a amplitude,  $k$  é o número de harmônicos variando de 1 até a metade do número total ( $n$ ) de elementos da série,  $t$  é o passo de tempo,  $\bar{y}$  é o valor médio da variável escolhida,  $Y$  é a série reconstruída e  $f$  é a frequência.

### 2.4 Limites de corte (LC)

Para cada período de tempo estudado são gerados gráficos dos espectros de energia de  $u$  e  $v$ . Em cada caso são escolhidos visualmente os LCs para a energia. Abaixo do LC os coeficientes  $A$  e  $B$  são zerados e acima do LC os coeficientes são mantidos, de maneira que a TIF é calculada com estes novos coeficientes, gerando uma nova série temporal.

### 2.5 Fator de Ganho (FG)

O FG é um escalar multiplicador para a amplitude do sinal para que os valores calculados da série recomposta sejam ajustados, sendo dado por:

$$FG_t = \frac{\sqrt{\bar{S}_t^2}}{\sqrt{\bar{Y}_t^2}} \quad (8)$$

em que  $\bar{Y}_t$  é o valor médio da TIF de  $u$  e  $v$  em cada passo de tempo  $t$  e  $\bar{S}_t$  é o valor médio da previsão da variável escolhida no tempo  $t$ .

### 2.6 Série Sintética

Uma série sintética totalmente periódica foi arbitrariamente criada com a finalidade de testar o método para uma situação de série de dados total-

mente periódica. A equação foi escrita na forma de soma de senos (Eq. 9) e os fatores multiplicadores das funções seno foram escolhidos aleatoriamente entre 0 e 1.

$$S = 0.1 \sin\left(i \frac{\pi}{512}\right) + 0.2 \sin\left(i \frac{\pi}{256}\right) + 0.7 \sin\left(i \frac{\pi}{64}\right) + 0.5 \sin\left(i \frac{\pi}{16}\right) + 0.3 \sin\left(i \frac{\pi}{16}\right) \quad (9)$$

em que,  $i$  assume valores entre 1 e 1249, que foi o valor indicado como total de horas da série completa.

O tamanho  $n$  da amostra para o cálculo dos coeficientes e da série de Fourier foi fixado em 1024. Após a aplicação do método, o resultado esperado seria que todos os valores gerados pela reconstrução com a TIF fossem iguais aos da série original. O período fundamental amostral  $n$  foi considerado como sendo os 9/10 iniciais da série e o tempo varia entre 1 e  $n$  e a frequência é calculada com a Eq. 7.

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}} \quad (12)$$

$$r = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{\sigma_X^2 \sigma_Y^2}} \quad (13)$$

## 2.7 Análises Estatísticas

A análise do desempenho da metodologia de preenchimento de falhas foi realizada por meio da comparação entre os valores estimados e observados, baseado nos seguintes parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação ( $r^2$ ), correlação linear de Pearson ( $r$ ), erro padrão de estimativa (EPE), índice de concordância ( $d$ ) e de confiança ( $c$ ).

O  $r^2$  mostra a qualidade do ajustamento obtido pelo preenchimento de falhas, sendo definido pela Eq. 10.

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

A correlação é uma medida de associação bivariada (força) do grau de relacionamento entre duas variáveis (Garson, 2009). A correlação mensura a direção e o grau da relação linear entre duas variáveis quantitativas (Moore, 2007). Em linhas gerais, o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) é uma medida de associação linear entre variáveis. Seu equacionamento é:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)(y_i - \bar{y}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}} \quad (11)$$

em que  $r$  é o coeficiente de correlação de Pearson,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  e  $y_1, y_2, \dots, y_n$  são os valores medidos em ambas as variáveis,  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são as médias aritméticas das variáveis,  $\sigma_X^2$   $\sigma_Y^2$  são as variâncias das variáveis,  $\sigma_X$   $\sigma_Y$  são os desvios padrão das variáveis e  $Cov(X, Y)$  são as covariâncias das variáveis. Segundo Allen *et al.* (1989), o erro padrão da estimativa é definido pela Eq. 15.

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N-1}} \quad (15)$$

O índice  $d$  de Willmott *et al.* (1983) (Eq. 16) mostra a dispersão dos valores estimados pelo método de preenchimento de falhas em relação aos observados. O seu valor varia de 0 a 1, sendo a precisão maior quanto mais próximo de 1 e menor precisão quando próximo a 0.

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - O_i| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (16)$$

em que,  $P_i$  é o  $i$ ésimo valor estimado do vento ( $m.s^{-1}$ ),  $O_i$  é o  $i$ ésimo valor observado de vento ( $m.s^{-1}$ ),  $\bar{O}$  é o valor médio observado do vento ( $m.s^{-1}$ ) e  $N$  é o número de dados analisados.

Analogamente, foi empregado o índice de confiança ( $c$  – Eq. 17) proposto por Camargo & Sentelha (1997).

$$c = r \times d \quad (17)$$

## 2.8 Metodologia

Cada série de dados correspondentes aos períodos  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  é decomposta em componentes  $u$  e  $v$  para os quais são calculados coeficientes A e B de Fourier (Eqs. 3 e 4), com  $k$  variando de 1 até  $n/2$ . Com os coeficientes, é encontrada a amplitude C (Eq. 5) e, posteriormente geradas as figuras com os espectros para análise de qual LC pode ser ajustado para cada componente. Após, a análise das figuras e escolha dos limites de corte, os coeficientes A e B abaixo destes limites foram zerados. A TIF (Eq. 6) foi calculada para reconstruir a série temporal a partir dos novos coeficientes A e B e, assim fazer a previsão dos valores de  $u$  e  $v$  das falhas. Os resultados das previsões são multiplicados pelo FG e comparados por meio das figuras com os dados observados.

Para cada período de tempo foram calculados os coeficientes A e B da TDF das componentes  $u$  e  $v$  do vento e, em seguida escolhidos LCs pelas análises espectrais. Os novos coeficientes foram aplicados na TIF para os horários das falhas que geram valores previstos de  $u$  e  $v$ , posteriormente multiplicados por FGs. Os novos valores de  $u$  e  $v$  foram então comparados com os valores originais. Como primeiro teste, a metodologia foi aplicada para uma série sintética.

## 3 Resultados e Discussões

### 3.1 Série Sintética

A série sintética gerada pela Eq. 9 mostrou o espectro com os picos em 0,002, 0,008, 0,03 e 0,125 ciclos/hora, que por sua vez representam as frequências com maiores quantidades de energia. A linha contínua mostra o LC (0,2) escolhido para este caso (Figura 2).

Após, aplicado o LC para cálculo dos coeficientes A e B, a série foi reconstruída com a TIF (Figura 3). A linha vermelha corresponde à série original e a linha preta à série reconstruída (prevista) pelo método proposto que apresenta pequena diferença numérica (0,06  $m.s^{-1}$ ) na amplitude com relação à

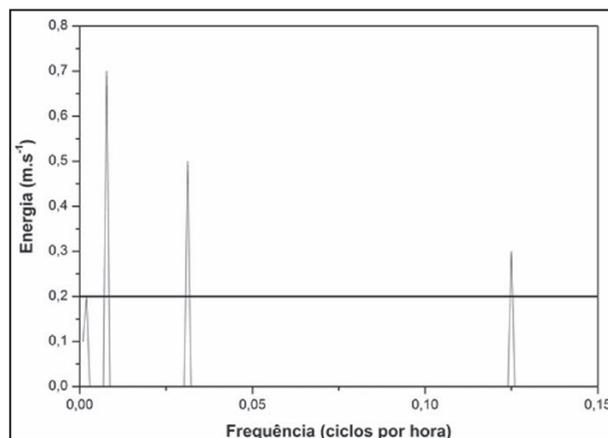


Figura 2 Espectro de potência da série sintética, com LC em 0,2.

série sintética. Isso se deve ao fato dos coeficientes A e B que correspondem às frequências que se considerou como baixa energia do espectro terem sido zerados. Este procedimento provocou uma diminuição da amplitude, pois foi retirada parte da energia do sistema da série sintética. Mesmo após a remoção, percebe-se que, foi possível prever o comportamento periódico da série temporal de velocidade do vento.

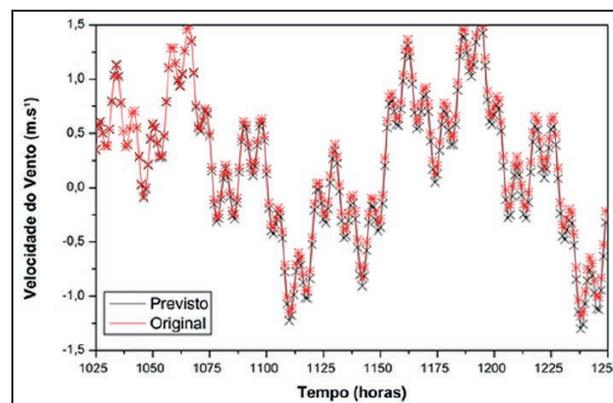


Figura 3 Séries prevista e original da velocidade do vento ( $m.s^{-1}$ ) superpostas ao longo do tempo.

### 3.2 Período 1 ( $P_1$ )

Verificam-se nas Figuras 4 (a) e (b) os espectros de  $u$  e  $v$ , respectivamente, além da linha constante que indica o LC. Após diversos testes, foram escolhidos os valores de 0,27 ( $u$ ) e 0,25 ( $v$ ) como LC.

Baseado nas Figuras 5 (a) e (b) nota-se em alguns trechos diferenças entre a série prevista e a ob-

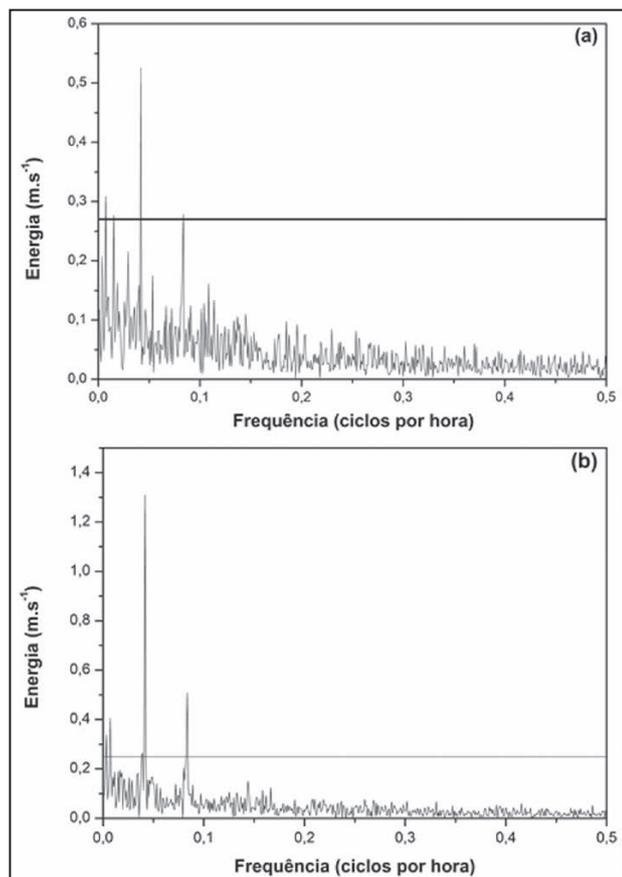


Figura 4 Espectros das componentes  $u$  em (a) e  $v$  em (b) ( $m.s^{-1}$ ) do vento do  $P_1$ . As linhas retas representam os LC para cada caso, sendo 0,27 para a componente  $u$  e 0,25 para a componente  $v$ .

servada (série original), principalmente nos pontos correspondentes ao intervalo compreendido entre 1156 h (dia 16/08/1988 – 17 h) e 1170 h (19/09/1988 – 7 h). Neste caso, os dados observados indicam regime de calmaria ou classe de vento de baixa intensidade, enquanto a previsão mostra que a intensidade do vento foi de aproximadamente  $1 m.s^{-1}$  nas direções E/W (Figura 5a). Apesar da diferença identificada em alguns trechos da série, o método proposto conseguiu reproduzir de maneira aproximada a componente  $u$  do período  $P_1$ . Os resultados referentes à componente  $v$  mostram que o método proposto reproduziu as variações de intensidade, com defasagem de tempo (5 horas) entre o pico previsto em 1171 horas (17/09/1988 – 9h) e o observado em 1176 horas (17/09/1988 – 13 h) e grande diferença de amplitude em 1230 horas (19/09/1988 – 19 h). Em comparação com a componente  $u$ , os melhores resultados foram obtidos pela componente  $v$  para o  $P_1$ .

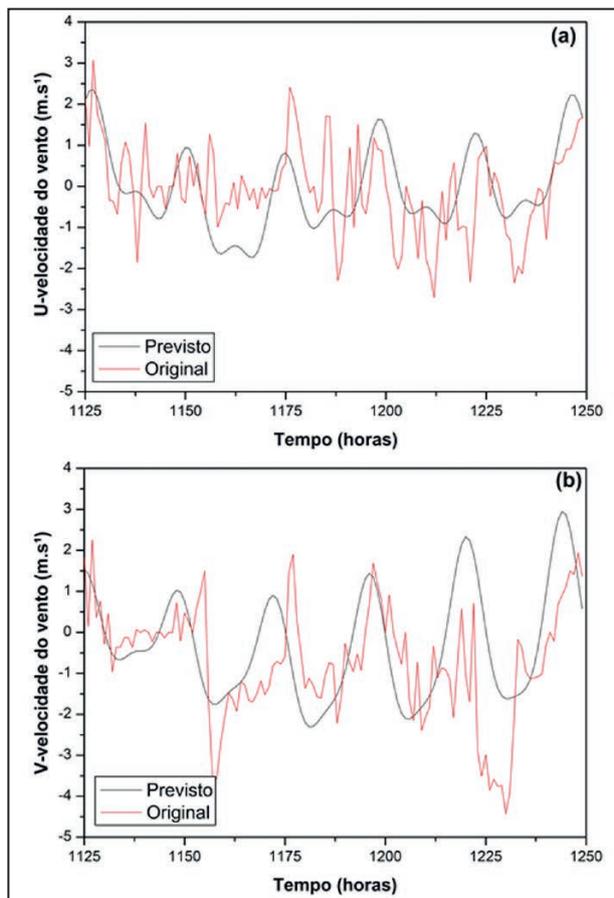


Figura 5 Séries temporais das componentes  $u$  em (a) e  $v$  em (b) do vento a 10 m. As linhas vermelhas representam os dados observados e, em preto, a previsão.

### 3.3 Período 2 ( $P_2$ )

Verificam-se nas Figuras 6 (a) e (b) os espectros de  $u$  e  $v$ , respectivamente, além da linha constante que indica o LC. Após diversos testes, foram escolhidos os valores de 0,16 para  $u$  e 0,30 para  $v$  como LC.

Na análise da componente zonal do  $P_2$  (Figura 7a), o método conseguiu acompanhar as tendências em alguns períodos como, por exemplo, entre 1337 horas (14/12/1988 – 12 h) até 1375 horas (16/12/1988 – 6h). Entretanto, em outros períodos, apresentou diferenças significativas como, por exemplo, em 1329 (14/12/1988 – 12 h) e 1337 horas (14/12/1988 - 16 h), além da inversão do pico em aproximadamente 1381 horas (16/12/1988 - 12 h). Aplicada à componente meridional (Figura 7b), a

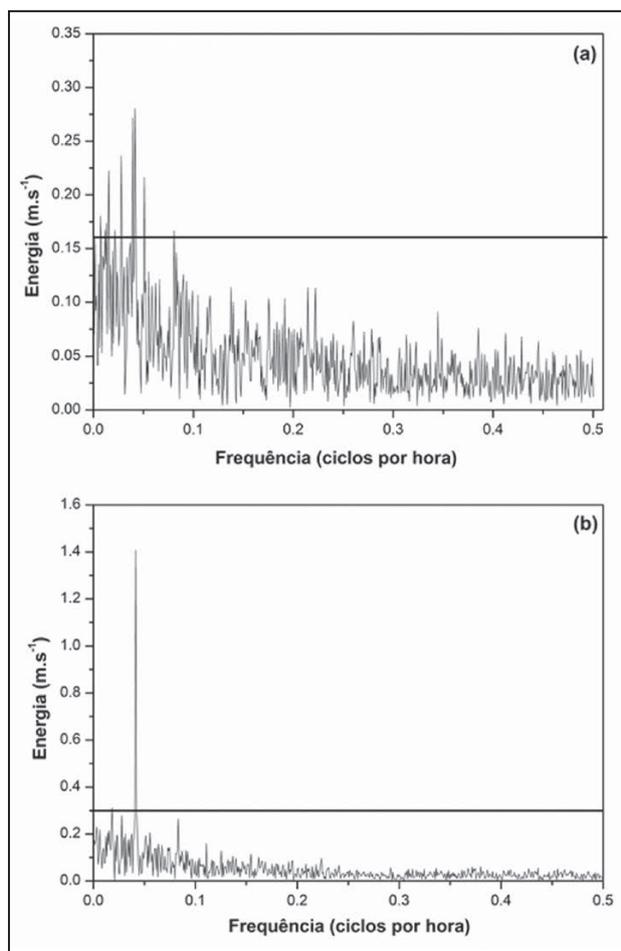


Figura 6 Espectros das componentes  $u$  em (a) e  $v$  (b) (m.s<sup>-1</sup>) do vento do  $P_2$ . As linhas retas representam os LC para cada caso, sendo 0,16 para a componente  $u$  e 0,30 para a componente  $v$ .

metodologia foi capaz de fazer a previsão para preencher a falha com relativa exatidão, apresentando poucas diferenças nos picos das séries não apresentando defasagens temporais.

### 3.4 Período 3 ( $P_3$ )

Verificam-se nas Figuras 8 (a) e (b) os espectros de  $u$  e  $v$ , respectivamente, além da linha constante que indica o LC. Após diversos testes, foram escolhidos os valores de 0,1 para  $u$  e 0,17 para  $v$  como LC.

Na avaliação da componente zonal para o  $P_3$  (Figura 9a), o método proposto conseguiu realizar a previsão, no entanto, pequenas diferenças ocorreram em alguns picos como, por exemplo, em 5415 horas

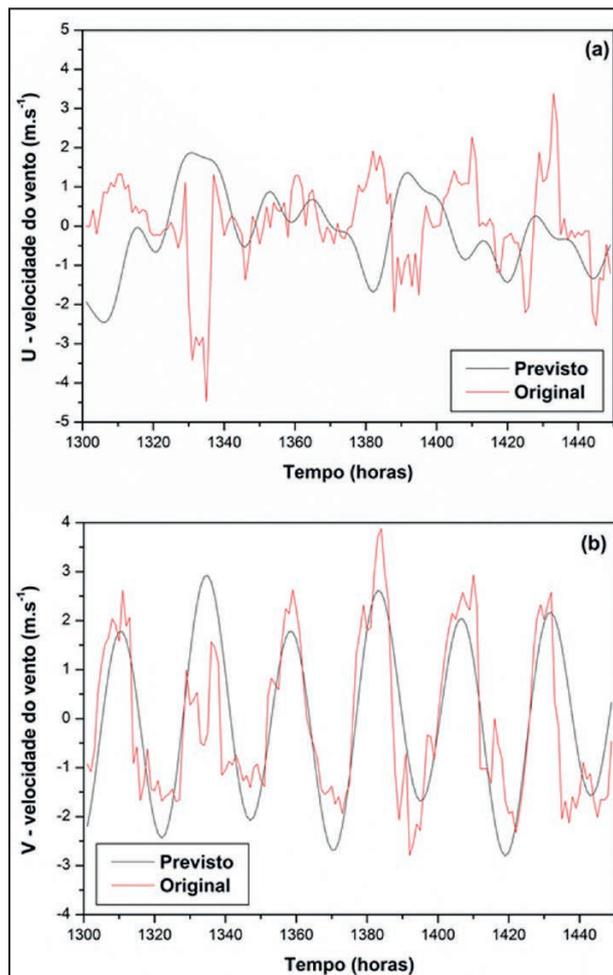


Figura 7 Séries temporais das componentes  $u$  em (a) e  $v$  em (b) do vento a 10 m. As linhas vermelhas representam os dados observados e, em preto, a previsão.

(07/05/2000 – 1 h), 5478 horas (09/05/2000 – 16 h). Nos outros horários, a metodologia proposta previu com relativo sucesso o comportamento periódico do vento. Quando aplicada à componente meridional, a metodologia reproduziu o comportamento periódico. Porém, o fator de ganho pode ter defasado verticalmente em relação a Figura 9b, aumentando as velocidades positivas e diminuindo as velocidades negativas. Este resultado sugere que o fator de ganho pode não ter sido um bom estimador da amplitude para falhas maiores nas séries temporais do  $P_3$ .

### 3.5 Estatística

Realizado o cálculo das componentes  $u$  e  $v$  da transformada de Fourier para três respectivos períodos ( $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ ), foram comparados a alguns parâ-

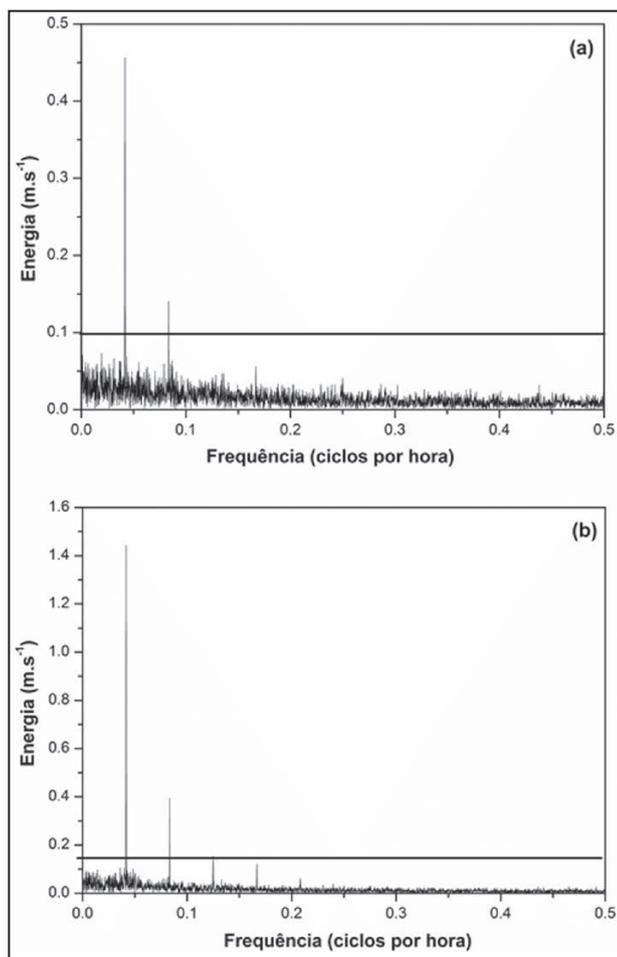


Figura 8 Espectros das componentes  $u$  em (a) e  $v$  em (b) ( $m.s^{-1}$ ) do vento do  $P_3$ . As linhas retas representam os LC para cada caso, sendo 0,10 para a componente  $u$  e 0,17 para a componente  $v$ .

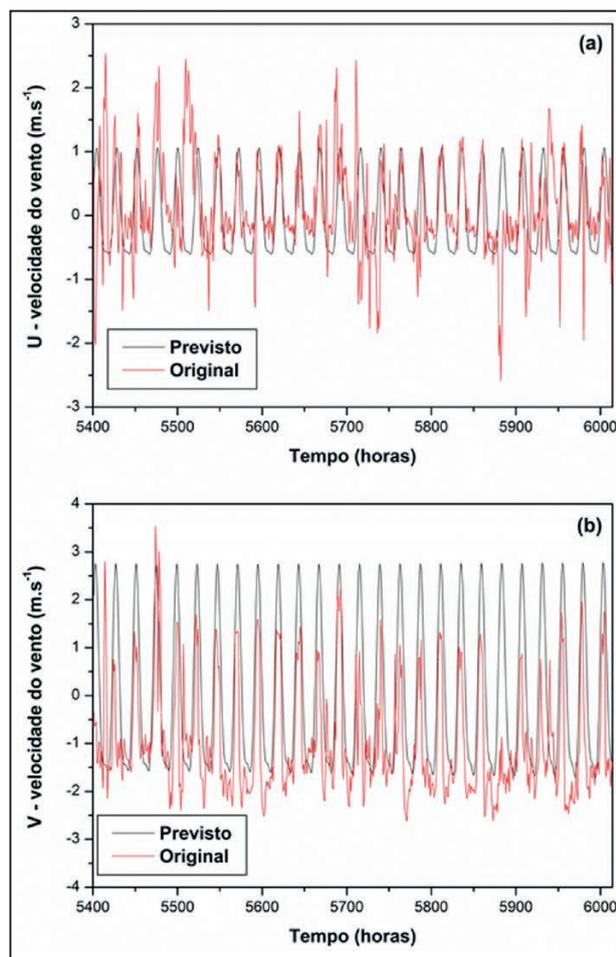


Figura 9 Séries temporais das componentes  $u$  em (a) e  $v$  em (b) do vento a 10 m. As linhas vermelhas representam os dados observados e, em preto, a previsão.

metros estatísticos ( $r$ ,  $r^2$ , EPE,  $d$  e  $c$ ) que indicam o grau de adequabilidade ou desempenho do método adotado no estudo.

A análise da Tabela 2, para os períodos ( $P_2$  e  $P_3$ ), indica variações significativas (altas), do coeficiente  $r$ , para as componentes  $u$  e  $v$ , seguido por um desempenho moderado das componentes no período  $P_1$ . Por sua vez, um baixo desempenho foi verificado pelo coeficiente  $r^2$  nos três períodos avaliados no estudo, respectivamente, com exceção a componente  $v$ , no período ( $P_2$ ) com um ( $r^2 = 0,62$ ).

Por outro lado o EPE, para os períodos ( $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ ) se mantiveram sem variações significativas em ambas as componentes  $u$  e  $v$  (Tabela 2), de acordo com o índice  $c$ . Há uma alta discrepância entre coe-

ficiente  $r$  e o índice  $c$  com o índice  $d$  para ambos os períodos avaliados. Outro resultado, foi com relação ao índice  $c$  aponta para um desempenho de sofrível a péssimo das componentes  $u$  e  $v$  estimadas.

Estatísticas/ Períodos	$P_1$		$P_2$		$P_3$	
	$\bar{u}$	$\bar{v}$	$\bar{u}$	$\bar{v}$	$\bar{u}$	$\bar{v}$
Componentes do vento						
$c$	0.32	0.29	0.31	0.60	0.47	0.35
$d$	0.76	0.64	0.67	0.76	0.78	0.64
$r$	0.42	0.46	0.46	0.79	0.60	0.54
EPE ( $m.s^{-1}$ )	0.93	1.23	0.96	1.00	0.62	1.10
$r^2$	0.18	0.22	0.22	0.62	0.36	0.29

Tabela 2 Análise estatística ( $d$ ,  $r$ , EPE,  $r^2$  e  $c$ ) das componentes do vento zonal ( $u$ ) e meridional ( $v$ ) para os períodos ( $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ ).

#### 4 Conclusões

A série sintética foi totalmente reconstruída e prevista com base na metodologia proposta. Em análise visual, em relação à componente zonal dos períodos, a metodologia proposta reproduz com razoável sucesso o comportamento periódico do vento, à exceção do regime de transição de escoamento na região da CNAAA. Para a componente meridional dos períodos  $P_1$  e  $P_2$ , a previsão reproduz as variações de intensidade de maneira satisfatória. A exceção é o período  $P_3$ , devido ao fator de ganho que pode não ter sido um bom estimador da amplitude para falhas maiores na série. Entretanto, na análise visual dos gráficos relacionados ao  $P_3$ , percebe-se que o método é capaz de reproduzir as variações periódicas do vento em ambas as componentes, principalmente a previsão em fase com os dados observados, com poucas exceções.

No geral, com base nos parâmetros estatísticos o método de preenchimento de falhas baseado em séries e transformada de Fourier para preenchimento de falhas nas séries temporais de velocidade do vento da torre meteorológica localizada na CNA-AA pode ser utilizado com ressalva nas demais torres como estimador de intensidade do vento, quando da falta de dados. A exceção é o índice  $c$  que mostra um desempenho de sofrível a péssimo das componentes do vento nos três períodos.

#### 5 Agradecimentos

Os autores agradecem a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) pela disponibilidade dos dados e ao revisor anônimo, que contribuiu com importantes correções e observações neste trabalho

#### 6 Referências

- Aguiar, A.S.; Lamego Simões Filho, F.F.; Alvim, A.C.M.; Pimentel, L.C.G. & Moraes, N.O. 2015. Station Blackout in unit 1 and analysis of the wind field in the region of Angra dos Reis. *Annals of Nuclear Energy*, 78(1): 93-103.
- Allen, R.G.; Jensen, M.E. & Bornan, R.D. 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*, 81(4): 650-662.
- Atkinson D. & Lee, R.F. 1992. *Procedures for Substituting*

*Values for Missing NWS Meteorological Data for Use in Regulatory Air Quality Models*. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttn/scram/surface/missdata.txt>> Acesso em 01/10/2012.

- Baldasano, J.M.; Clar, J. & Berna, A. 1988. Fourier Analysis of Daily Solar Radiation Data In Spain. *Solar Energy*, 41(4): 327-333.
- Beaulieu, C.; Ouarda, T.B.M.J & Seidou, O. 2007. A review of homogenization techniques for climate data and their applicability to precipitation series. *Hydrological Sciences Journal*, 52(1): 18-37.
- Brito, T.T.; Oliveira Júnior, J.F.; Lyra, G.B.; Gois, G. & Zeri, M. 2016. Multivariate analysis applied to monthly rainfall over Rio de Janeiro state, Brazil. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 129(5): 469-478.
- Camargo, A. P. & Sentelhas, P. C. 1997. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 5(1): 89-97.
- Dorvlo, A.S.S. 2000. Fourier analysis of meteorological data for Seeb. *Energy Conversion and Management*, 41(12): 1283-1291.
- Eischeid, J.K.; Pasteris, P.A.; Diaz, H.F.; Plantico, M.S. & Lott, N.J. 2000. Creating a Serially Complete, National Daily Time Series of Temperature and Precipitation for the Western United States. *Journal of Applied Meteorology*, 39(9): 1580-1591.
- Garson, G.D. 2009. *Regression Analysis, from Statnotes: Topics in Multivariate Analysis*. Disponível em: <<http://ondrej.vostal.net/pub/skola/statnote.htm>> Acesso em 15/08/2017.
- Kemp, W.P.; Burnell, D.G.; Eversond, O. & Thomson, A.J. 1983. Estimating Missing Daily Maximum and Minimum Temperatures. *Journal Climate Applied of Meteorology*, 22(9): 1587-1593.
- Kline, J. & Milligan, M.R. 1998. *An Evaluation of Hourly Average Wind-speed Estimation Techniques*. National Renewable Energy Laboratory. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24664.pdf>> Acesso em 12/05/2016.
- Leão, I.L.B. & Pereira, J.F. 1976. *Atividades desenvolvidas para complementação dos estudos meteorológicos do sítio de Angra dos Reis*. Relatório Técnico nº 551.1 – L 433a, Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 56 p.
- Lyra, G. B.; Oliveira-Júnior, J.F.; Gois, G.; Cunha-Zeri, G. & Zeri, M. 2017. Rainfall variability over Alagoas under the influences of SST anomalies. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 129(2): 157-171.
- Lyra, G.B.; Zanetti, S.S.; Santos, A.A.R.; Souza, J.L.; Lyra, G.B.; Oliveira-Júnior, J.F.; Lemes, M.A.M. 2016. Estimation of monthly global solar irradiation using the Hargreaves-Samani model and an artificial neural network for the state of Alagoas in northeastern Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 125(3): 743-756.
- Moore, D.S. 2007. *The Basic Practice of Statistics*, 4<sup>a</sup> ed., Freeman, New York, United States of America, 728p.
- Nicoli, D. 1986. *Primeira campanha de experimento de difusão atmosférica na área da Central Nuclear de Angra dos Reis – análise de resultados, julho*. Relatório Técnico nº 133, Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 100 p.

- Oliveira Júnior, J.F. & Pimentel, L.C.G. 2009. Estudo da Camada Limite Atmosférica na Região de Angra dos Através do Modelo de Mesoescala MM5 e Dados Observacionais. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27(1): 138-138.
- Oliveira Júnior, J.F.; Pimentel, L.C.G. & Landau, L. 2010. Critérios de Estabilidade Atmosférica para a Região da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, Angra dos Reis-RJ. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(2): 270-285.
- Rocha, A.M.G.C. & Gandu, A.W. 1996. South Atlantic Convergence Zone (in Portuguese). *Climanálise (10 year Special Edition)*, 140-142.
- Salcedo, A.C. & Baldasano, J.M.F. 1984. Fourier Analysis of Meteorological Data to Obtain a Typical Annual Time Function. *Solar Energy*, 32(4): 479-488.
- Satyamurty, P.; Nobre, C. A. & Silva Dias, P. L. 1998. Tropics-South America. Chapter in Meteorology of the Southern Hemisphere. Meteorological Monograph-American Meteorology Society, 27: 201-225.
- Schneider, T. 2001. Analysis of incomplete climate data: Estimation of mean values and covariance matrices and imputation of missing values. *Journal of Climate*, 14(5): 853-871.
- Silva, C.; Pimentel, L.C.G.; Landau, L.; Heilbron Filho, P.F.L.; Gobbo, F.G.R. & Sousa, P.J. 2017. Supportive elements to the decision-making process in the emergency planning of the Angra dos Reis Nuclear Power Complex, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 76(133): 1-16.
- Tardivo, G. & Berti, A., 2012. A Dynamic Method for Gap Filling in Daily Temperature Datasets. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(6): 1079-1086.
- Wilks, D. S. 2005. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2<sup>nd</sup> ed., Amsterdam: Elsevier. 648p.
- Willmott, C.J.; Ackleson, S.G.; Davis, R.E., Feddema, J.J.; Klink, K.M.; Legates, D.R.; O'Donnell, J. & Rowe, C.M. 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, 90(C5): 8995-9005.
- Yasunari, T.J.; Stohl, A.; Hayano, R.S.; Burkhart, J.F.; Eckhardt, S. & Yasunari, T. 2011. Cesium-137 deposition and contamination of Japanese soils due to the Fukushima nuclear accident. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(49): 19530-19534.