

VALIDAÇÃO DE DADOS DE VENTO DA REANÁLISE ERA5-LAND PARA ESTIMATIVA DE POTENCIAL EÓLICO NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Rose Angela Hilda Wanzeler Braga¹
Eliane Barbosa Santos¹
Matheus Ferreira de Barros²

¹Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

²Universidade Federal do Rio de Janeiro

DOI: 10.47168/rbe.v27i4.592

RESUMO

A geração de energia eólica no Brasil é crescente. Todavia, ainda é difícil encontrar regiões com disponibilidade de dados de vento consistentes e confiáveis. Uma solução alternativa para este problema é a utilização de dados de reanálise meteorológica. Diante disso, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar a confiabilidade dos dados de vento da reanálise ERA5-Land visando obter uma avaliação preliminar do potencial eólico no estado do Rio de Janeiro. Para tanto, foram utilizados dados horários de velocidade e direção do vento de duas estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas nos municípios de Macaé e Campos dos Goytacazes, nos períodos de 01/01/2007 a 31/12/2018 e de 01/01/2009 a 31/12/2018, respectivamente. Os dados do ERA5-Land foram extraídos, para os mesmos períodos, do ponto de grade mais próximo das duas estações meteorológicas selecionadas. O desempenho dos dados de reanálise foi avaliado através da evolução temporal, sazonal (por estação do ano) e horária (de 6 em 6 horas). Inicialmente, a comparação dos dados foi realizada com gráficos de análise descritiva. Em seguida, foram utilizadas métricas estatísticas que auxiliam na avaliação do grau de semelhança entre a reanálise e a observação. Por fim, foi calculada a densidade de potência dos dois conjuntos de dados. De acordo com os resultados obtidos, há uma boa concordância entre os dados observados e os de reanálise ao longo de todo o período analisado. Os dados da reanálise ERA5-Land conseguem reproduzir os ciclos sazonais e horários da velocidade do vento nas duas regiões estudadas, assim como o comportamento geral da série temporal. No entanto, o ERA5-Land apresentou tendência de superestimar a velocidade do vento. Com isso, a densidade de potência

estimada com base nos dados do ERA5-Land atingiu, em geral, aproximadamente o dobro do valor obtido quando estimado com base nos dados observados, deixando transparecer uma fragilidade quanto à aplicação em estudos de aproveitamento eólico.

Palavras-chave: Energia eólica; Litoral norte fluminense; Densidade de potência.

ABSTRACT

Wind power generation is increasing in Brazil. However, regions with availability of consistent and reliable wind data are still difficult to find. An alternative solution to this problem is the use of meteorological reanalysis data. Therefore, the main objective of this work was to evaluate the reliability of ERA5-Land reanalysis wind data, aiming to obtain a preliminary evaluation of the wind potential in the state of Rio de Janeiro. For that, hourly data of wind speed and direction from two automatic meteorological stations of the National Institute of Meteorology (INMET) were used, located in the municipalities of Macaé and Campos dos Goytacazes, in the periods from 01/01/2007 to 12/31/2018 and from 01/01/2009 to 12/31/2018, respectively. ERA5-Land data were extracted, for the same periods, from the grid point closest to the two selected weather stations. The performance of the reanalysis data was evaluated by temporal, seasonal (by season) and hourly (every 6 hours) evolution. Initially, the data comparison was performed with descriptive analysis graphs. Then, statistical metrics were used to help assess the degree of similarity between reanalysis and observation. Finally, the power density of the two data sets was calculated. According to the results obtained, there is a good agreement between the observed data and the reanalysis data throughout the analyzed period. The ERA5-Land reanalysis data can reproduce the seasonal and hourly cycles of wind speed in the two regions studied, as well as the overall behavior of the time series. However, the ERA5-Land tended to overestimate wind speed. Thus, the power density estimated based on ERA5-Land data reached about twice the value when estimated on the basis of the observed data, showing a weakness in the application in wind farm studies.

Keywords: Wind Energy; Fluminense North Coast; Power Density.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda energética mundial, agregado a fatores como a necessária atenuação de impactos ambientais decorrentes do aumento das emissões de poluentes atmosféricos e o

aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, tem motivado a busca por fontes de energia limpas e renováveis (IPCC, 2011). Nos últimos anos, o Brasil, na busca pela diversificação da matriz energética, tem envidado esforços na identificação de potenciais sítios para geração de energia eólica (PINTO et al., 2014), valorizando, com isso, as características regionais do país.

De acordo com o Boletim Anual de Geração Eólica (ABEEÓLICA, 2019), no ano de 2019 o Brasil atingiu a 7ª posição no ranking mundial de capacidade eólica acumulada elaborado pelo *Global Wind Energy Council*, com 15,45 GW de capacidade instalada e mais de 7 mil aerogeradores funcionando em 621 parques eólicos, em 12 estados. O Nordeste brasileiro foi o responsável pela maior parte da geração eólica (86,7%), seguido pelo Sul (10,3%), Norte (2,9%) e Sudeste (0,06%) (ABEEÓLICA, 2019).

Apesar da pequena parcela do potencial eólico aproveitado no Sudeste, essa região, segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE et al., 2001), é a segunda com maior valor estimado, com estimativa anual de 29,7 GW de potência para vento médio anual igual ou superior a 7,0 m/s. No estado do Rio de Janeiro, o Norte Fluminense e a Região dos Lagos são as regiões com os maiores potenciais eólicos, com destaque para o litoral, por apresentar as maiores velocidades médias do vento (AMARANTE et al., 2001). De Deus (2008), analisando a variabilidade dos ventos no litoral da região norte do estado do Rio de Janeiro, concluiu que a região é promissora para sediar empreendimentos eólicos, uma vez que, na direção predominante do vento (nordeste), a velocidade média encontrada (9,45 m/s a 50m de altura) é superior à média identificada para outras regiões do Brasil.

Teixeira (2018) estudou os padrões de vento no estado do Rio de Janeiro e identificou que, dentre 12 cidades analisadas, Campos dos Goytacazes e Macaé estão entre as quatro cidades com velocidades mais elevadas. Destacou, também, que as referidas cidades apresentam a vantagem do vento ter persistência em poucas direções. Aguiaras Junior (2011) fez uma caracterização preliminar da direção e da velocidade do vento no município de Macaé, de setembro de 2009 a agosto de 2011, e concluiu que a velocidade e direção do vento variaram em função da altura de monitoramento e ao longo dos meses do ano e das horas do dia. Muniz et al. (2009) realizaram a caracterização preliminar da direção e velocidade do vento no município de Campos dos Goytacazes e identificaram que os meses de setembro a janeiro apresentaram as maiores velocidades médias do período de estudo, sendo, a média máxima de 7,99 m/s (50 m) e a média mínima de 0,17 m/s na mesma altura.

É importante destacar que a viabilidade de um projeto de energia eólica está diretamente associada ao aproveitamento da energia

cinética dos ventos e de como esse recurso energético varia no local do empreendimento. Portanto, a confiabilidade da estimativa e da variabilidade do vento em um determinado local é essencial, tanto para a avaliação da viabilidade econômica, quanto para o planejamento e gerenciamento do sistema de distribuição de eletricidade a que a planta eólica está conectada (PINTO et al., 2014). Todavia, em algumas regiões não existe a disponibilidade de dados de vento consistentes e confiáveis. Uma solução alternativa para este problema é a utilização de dados de reanálise meteorológica, que são dados obtidos através da assimilação e análise de dados observados em superfície (estações), aviões, navios, imagens de satélite, imagens de radar e radiosondagens em todo o planeta (KALNAY et al., 1996). No entanto, vale ressaltar que esses dados podem apresentar diferenças significativas em relação aos dados observados.

Fontenelle (2019), ao estudar o potencial preliminar em áreas urbanas do Rio de Janeiro/RJ, São Paulo/SP e Belo Horizonte/MG, concluiu que a reanálise atmosférica ERA Interim é uma boa alternativa para locais onde há dificuldades quanto a dados medidos. Oliveira Filho et al. (2021), ao estudarem a reanálise do Sistema de Previsão Global (GFS) para representar o vento em Minas Gerais (MG), verificou que, na maioria das áreas estudadas, os valores da velocidade do vento fornecidos pela reanálise GFS, a 10 metros, foram semelhantes aos registrados pelas estações meteorológicas, concluindo que o produto pode ser usado para estimar o potencial eólico em regiões com poucos dados meteorológicos.

Diante do exposto, o uso de dados de reanálise em estudo preliminar do potencial eólico pode ser justificado pela necessidade de obtenção de dados de vento, entretanto, faz-se necessária a verificação da confiabilidade dos dados. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a confiabilidade dos dados de vento da reanálise ERA5-Land, mediante um estudo comparativo com os dados das estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), visando obter uma avaliação preliminar do potencial eólico no estado do Rio de Janeiro.

2. METODOLOGIA

2.1 Dados

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados dados horários de velocidade e direção do vento, medidos a dez metros de altura, de duas estações meteorológicas automáticas do INMET, localizadas no estado do Rio de Janeiro, nas cidades de Macaé e Campos

dos Goytacazes – São Tomé, conforme mostra a Figura 1. Para avaliar a qualidade dos dados, os mesmos foram submetidos as seguintes etapas: i) os registros com suspeita de erros ou problemas foram considerados dados ausentes; ii) os dados ausentes (ou descartados) não foram preenchidos; iii) após as duas primeiras etapas, foi calculada a porcentagem de falhas da série temporal horária. Os períodos de análise foram de 01/01/2007 a 31/12/2018, para Macaé, e de 01/01/2009 a 31/12/2018, para Campos dos Goytacazes – São Tomé, com percentual de falhas de 4,9% e 15,2%, respectivamente.

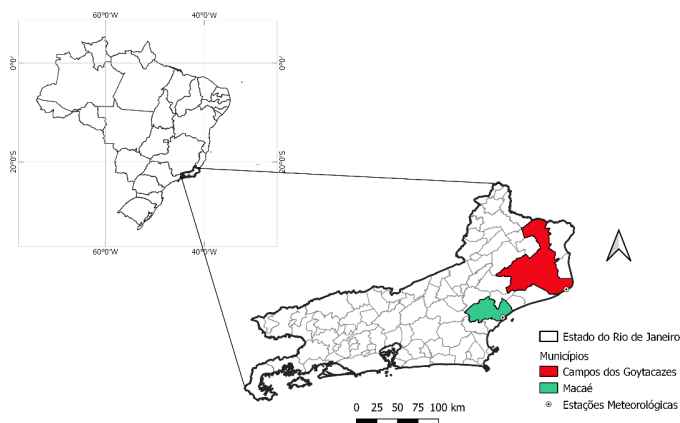


Figura 1 – Localização dos municípios e das estações meteorológicas utilizadas

Os dados observados, obtidos do INMET, foram utilizados para verificar a confiabilidade de dados de reanálise, que é um conjunto de dados obtidos através da combinação entre dados de modelos de circulação global e uma grande quantidade de dados provenientes de observações em superfície (estações), aviões, navios, imagens de satélite, imagens de radar e radiossondagens em todo o planeta (KALNAY et al., 1996). Portanto, as séries históricas de reanálise são obtidas a partir de uma grande variedade de fontes. A técnica de reanálise processa, simultaneamente, essa grande variedade de dados, usando as leis físicas contidas nos modelos de previsão do tempo (PINTO et al., 2009).

Neste estudo, foram utilizados dados da reanálise ERA5-Land, que é uma versão do ERA5, quinta geração de reanálises atmosféricas do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF)

de clima global. O ERA5-Land apresenta uma série de melhorias e é executado com uma resolução horizontal aprimorada (9 km vs 31 km no ERA5). A resolução temporal dos dados é horária, com dados de 2001 até o presente. Neste trabalho, os períodos analisados foram os mesmos das estações meteorológicas do INMET, com dados de reanálise extraídos dos pontos de grade mais próximos das citadas estações.

Como o ERA5-Land fornece apenas as componentes zonal (leste-oeste, denotada por u) e meridional (norte-sul, denotada por v) do vento, foram utilizadas as Equações 1 e 2 para obtenção da velocidade (\bar{V}) e da direção (\bar{D}) do vento (STÜKER et al., 2016), respectivamente:

$$\bar{V} = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

$$\bar{D} = -\arctg\left(\frac{u}{v}\right) \quad (2)$$

As componentes zonal e meridional (u e v) do vento a 10 metros da reanálise ERA5-Land foram extraídas para o mesmo período e do ponto de grade mais próximo das duas estações do INMET selecionadas. A velocidade e a direção do vento foram calculadas para as séries sazonais e horárias, com frequência de 6 horas (UTC), para ambas as estações.

Importante esclarecer que a direção do vento é definida como a direção de onde ele sopra e a sua medida é feita no sentido horário, a partir do norte geográfico (verdadeiro), no sentido do movimento dos ponteiros do relógio. Assim, de acordo com os graus da circunferência, e tendo por referência os pontos cardeais, 360° indica o norte, 90° o leste, 180° o sul e 270° o oeste.

2.2 Análise estatística

Visando à avaliação do desempenho das séries de dados da reanálise ERA5-Land, foi realizada a comparação com os dados observados das estações do INMET. Inicialmente, a comparação foi realizada com gráficos de análise descritiva, utilizando o *software* R versão 3.6.1. Também foi utilizado o *software* *WRPLOT View*, desenvolvido pela *Lakes Environmental*, para gerar gráficos do tipo rosa dos ventos. Em seguida, foram utilizadas métricas estatísticas que auxiliam na avaliação do grau de semelhança entre a reanálise e a observação. Neste

trabalho, os dados foram analisados em intervalos de 6 em 6 horas (análise horária) e por estações do ano (análise sazonal).

As métricas estatísticas utilizadas foram: o viés, o erro absoluto médio (EAM), a raiz do erro quadrático médio (REQM) e o coeficiente de correlação de Pearson (r), que podem ser calculadas pelas seguintes equações (WILKS, 2006; DE MARIA et al., 2008; MARIANO et al., 2017):

$$Viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\phi_i - \phi_{oi}) \quad (3)$$

$$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |\phi_i - \phi_{oi}| \quad (4)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\phi_i - \phi_{oi})^2} \quad (5)$$

$$r = \frac{\sum(\phi_i - \bar{\phi}_i)(\phi_{oi} - \bar{\phi}_{oi})}{\sqrt{\sum(\phi_i - \bar{\phi}_i)^2 \sum(\phi_{oi} - \bar{\phi}_{oi})^2}} \quad (6)$$

Nas equações 3 a 6, N é o número de amostras, ϕ_i representa o dado da reanálise, ϕ_{oi} é o observado nas estações meteorológicas, $\bar{\phi}_i$ é a média dos dados de reanálise e $\bar{\phi}_{oi}$ é a média dos dados observados. Na Equação 6, o nível de significância do coeficiente de correlação foi verificado pelo teste t de Student (STUDENT, 1908).

Segundo Mariano et al. (2017), o viés é um parâmetro que quantifica a diferença média entre dois conjuntos de dados, indicando a tendência para superestimativa ou subestimativa de uma variável. Um viés igual a zero indica aproximações perfeitas ($\phi_i - \phi_{oi}$), enquanto um valor positivo de viés indica uma tendência de superestimativa da variável em questão. Da mesma forma, um viés negativo implica uma tendência de subestimativa dos dados de reanálise em relação aos observados.

O EAM foi utilizado para verificar o afastamento (desvio) médio absoluto dos dados da reanálise em relação aos dados observados. Este parâmetro só pode atingir valores positivos e quanto menor seu valor, maior é a semelhança entre as séries de dados confrontadas (DE LIMA et al., 2012). Já o REQM foi utilizado com o objetivo de avali-

ar a dispersão dos desvios entre reanálise e observação (PINTO et al., 2014). Por ter a diferença elevada ao quadrado, os valores de REQM serão sempre positivos. Nesse sentido, quanto mais próximo seu valor for de zero, mais similares serão as médias dos dois conjuntos de dados. Este índice aumenta de zero (simulações/previsões perfeitas) para valores mais elevados positivos à medida que as discrepâncias entre simulações e observações se tornam maiores (WILKS, 2006).

Por fim, foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson (r), que mede a associação entre duas variáveis quantitativas indicando o grau de correlação linear entre elas. Esse coeficiente pode assumir valores entre -1 e 1, onde um valor igual a 1 significa correlação perfeita e positiva entre as duas variáveis. De forma semelhante, um valor igual a -1 significa correlação perfeita, porém negativa, ou seja, enquanto uma variável aumenta a outra diminui. Já valores iguais a zero sinalizam a ausência total de correlação (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009).

2.3 Potencial eólico

A avaliação do potencial eólico foi realizada por meio do cálculo da densidade de potência, utilizando os dados observados (INMET) e de reanálise (ERA5-Land), através da Equação 7 (TEIXEIRA; CAMELO, 2013):

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (7)$$

onde $\frac{P}{A}$ é a densidade de potência (Watts/m²), ρ é a massa específica do ar (kg/m³) e V é a velocidade do vento (m/s) na altura em estudo.

Da Equação 7, destaca-se que a velocidade do vento é o principal fator no cálculo da densidade de potência, uma vez que tal potencial é diretamente proporcional ao cubo da velocidade média. Portanto, pequenas mudanças na velocidade do vento acarretam grandes alterações na energia produzida.

A densidade de potência foi calculada a partir da massa específica do ar, de 1,225 kg/m³, e velocidade do vento nas alturas de 10, 50 e 100 metros. Para a extrapolação das velocidades para as alturas de 50 e 100 metros, foi utilizada a lei logarítmica representada pela Equação 8 (LIRA et al., 2011).

$$V(Z) = V(Z_R) \frac{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_R}{Z_0}\right)} \quad (8)$$

sendo $V(Z)$ a velocidade do vento na altura Z , $V(Z_R)$ a velocidade do vento na altura de referência (medida), Z a altura desejada, Z_R a altura de referência e Z_0 o comprimento de rugosidade local.

Como a extrapolação impacta no cálculo da velocidade do vento e, conseqüentemente, na estimativa do potencial eólico, neste estudo foi realizada a extrapolação de ambos os dados (observados/INMET e reanálise/ERA5-Land) de velocidade do vento da altura de 10 metros para as alturas de 50 e 100 m.

Krüger (2016) define rugosidade como sendo o efeito conjunto dos elementos do terreno (vegetação, cobertura de neve, condições do mar, tipos de agricultura, usos do solo, etc.), cuja irregularidade causa a desaceleração dos ventos em superfície. Neste estudo, o comprimento de rugosidade considerado foi de $Z_0=0,5$ m (Periferia) para a estação de Macaé e $Z_0=0,3$ m (Planície com algumas construções, árvores, etc.) para Campos dos Goytacazes – São Tomé, seguindo as classes e comprimentos da rugosidade do Atlas Eólico Europeu (MORTENSEN, 1993; TROEN, 1989).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise sazonal

A Figura 2 mostra a comparação entre a velocidade do vento dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land), por estação do ano, para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé. Em relação à dispersão, observa-se que os dados apresentam comportamentos semelhantes, no entanto, nota-se, nas medidas de tendência central (média e mediana), que o ERA5-Land apresenta uma predisposição em superestimar a velocidade do vento, em ambas as cidades. Ademais, constata-se que há uma concordância entre os dados no que diz respeito à existência de extremos (*outliers*), como se observa no verão (dezembro, janeiro, fevereiro - DJF) em Macaé.

De forma geral, a Figura 2 revela que as maiores velocidades (dados observados e reanálise) são registradas na primavera (setembro, outubro, novembro - SON) e, as menores, no outono (março, abril, maio – MAM), em ambas as regiões. Esse resultado está de acordo com Teixeira (2018), que, utilizando o método de análise de *cluster*, verificou que as velocidades do vento em Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé apresentam comportamento semelhante. Além disso, frisa-se que as velocidades médias, sejam observadas ou da reanálise, são maiores em Campos dos Goytacazes – São Tomé, em todas as estações do ano.

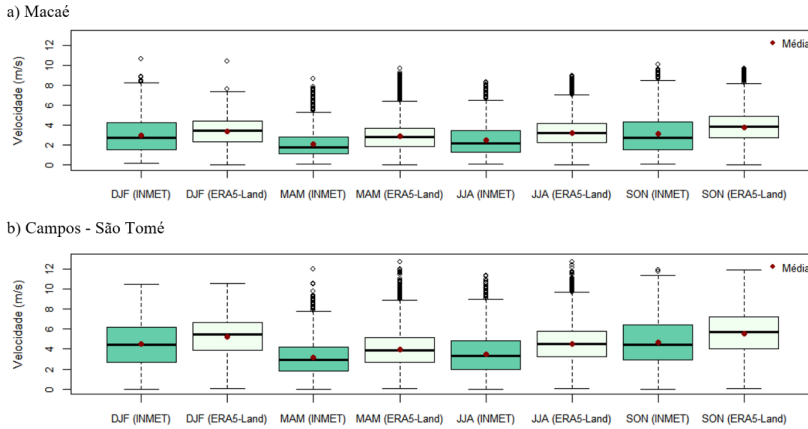


Figura 2 – Boxplot da velocidade do vento (m/s) dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land), por estação do ano; A. Macaé; B. Campos dos Goytacazes – São Tomé

As médias dos dados de reanálise foram sempre acima das médias dos dados observados, sobretudo no inverno (junho, julho, agosto - JJA) em Campos dos Goytacazes – São Tomé. A menor diferença foi observada no verão (DJF), com valores de 0,47 m/s e 0,74 m/s em Macaé e em Campos dos Goytacazes – São Tomé, cujos percentuais de erro relativo à diferença entre as médias foram de 16,15% e 16,52%, respectivamente. As maiores diferenças foram verificadas nas estações do ano em que os ventos são mais fracos, como no outono (MAM), em Macaé, e no inverno (JJA), em Campos dos Goytacazes – São Tomé, cujos valores são de 0,75 m/s (35,71% de erro) e 1,03 m/s (29,51% de erro), respectivamente.

Nas Figuras 3 e 4, observam-se as frequências (%) da direção do vento e da intensidade da velocidade, por estação do ano, através das rosas dos ventos. Com relação à direção, de forma geral, nota-se concordância entre os dados observados (INMET) e de reanálise (ERA5-Land), com predominância de nordeste ao longo do ano, com maior frequência no verão (DJF), seguido da primavera (SON), em ambas as regiões.

No verão, a persistência do vento na direção nordeste é em torno de 41% (INMET) e 53% (ERA5-Land) em Macaé, e 45% (INMET) e 67% (ERA5-Land) em Campos dos Goytacazes – São Tomé. No outono (MAM) e inverno (JJA), é possível verificar que o vento apresenta padrão de vários quadrantes, mas sempre com predominância de ventos de nordeste, em todas as estações do ano, estando em concordância

cia com o estudo de Aguiéiras Junior (2011), que analisou as características do vento em Macaé. É importante ressaltar que a predominância de ventos em uma direção é condição favorável para a implantação de empreendimentos eólicos, considerando a disposição permanente dos equipamentos utilizados (COSTA; LYRA, 2012).

Com relação à intensidade da velocidade, confirma-se, nas Figuras 3 e 4, a tendência de superestimativa por parte da reanálise. Observa-se que, nas faixas de maiores (menores) velocidades, a frequência é maior (menor) para os dados de reanálise.

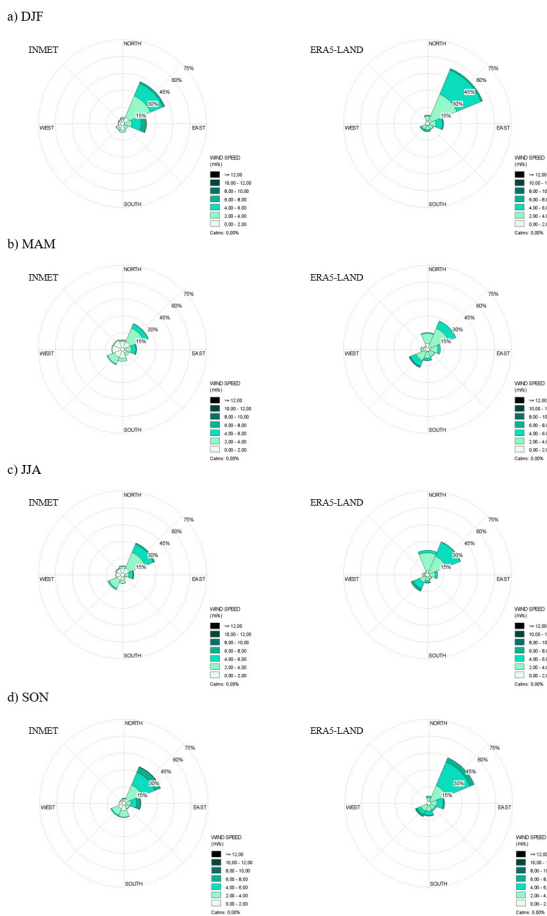


Figura 3 – Rosa dos ventos dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) por esta-ção do ano para Macaé; A. Verão (DJF); B. Outono (MAM); C. Inverno (JJA); D. Primavera (SON).

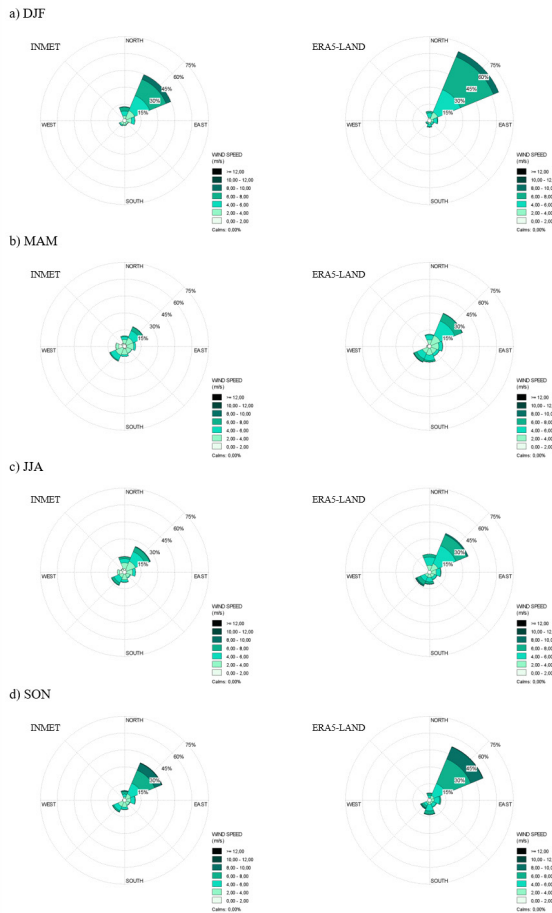


Figura 4 – Rosa dos ventos dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) por esta-ção do ano para Campos dos Goytacazes – São Tomé; A. Verão (DJF); B. Outono (MAM); C. In-verno (JJA); D. Primavera (SON).

3.2 Análise horária

Na escala horária (6 em 6 horas), conforme mostra a Figura 5, os dados também apresentam comportamento semelhante, com velocidades maiores registradas entre 12 e 23 horas (UTC). Nesse período (12-23 horas), as médias foram maiores que 3 e 4 m/s, em Macaé e

Campos dos Goytacazes – São Tomé, respectivamente. Nota-se também que o horário que apresentou maior concordância entre os dados observados e de reanálise foi entre 12 e 17 horas (UTC), em ambas regiões (Figura 5), pois apresentaram as menores diferenças entre as médias, sendo de 0,23 m/s, em Macaé, e 0,09 m/s, em Campos dos Goytacazes – São Tomé, com percentuais de erro relativo à diferença entre as médias de 7,14% e 1,90%, respectivamente.

Na Figura 5 também é possível constatar a tendência do ERA5-Land em superestimar a velocidade do vento, sendo o erro relativo à diferença entre as médias maior nos horários em que os ventos são mais fracos, como ocorre de 00h-11h em ambas as cidades. No intervalo de 00h-05h, as diferenças obtidas são de 0,94 m/s para Macaé, com erro de 43,12%, e de 1,33 m/s, com percentual de erro de 39,12%, para Campos dos Goytacazes – São Tomé. No período de 06h-11h, tais valores são de 0,68 m/s para Macaé, com erro de 32,54%, e de 0,98 m/s, para Campos dos Goytacazes – São Tomé, com percentual de erro de 30,25%.

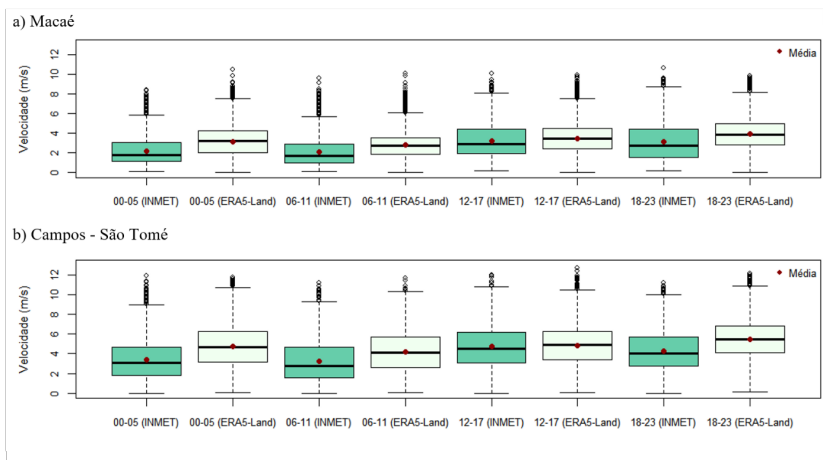


Figura 5 – Boxplot da velocidade do vento (m/s) dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land), de 6 em 6 horas (UTC); A. Macaé; B. Campos dos Goytacazes – São Tomé

As Figuras 6 e 7 mostram a frequência da direção e da intensidade da velocidade do vento na escala horária (6 em 6 horas), por meio das rosas dos ventos. No que diz respeito à intensidade da velocidade do vento, é possível confirmar que os dados do ERA5-Land foram

superestimados nas duas cidades em estudo. Em Macaé, por exemplo, destaca-se o período entre 00 e 05 horas (UTC), intervalo em que os dados do ERA5-Land mostram frequência em torno de 27%, na faixa entre 4 m/s e 6 m/s, o que equivale aproximadamente ao triplo do percentual observado nos dados do INMET (10%).

Em relação à direção do vento, observa-se que, de forma geral, os dados de Macaé (Figura 6) apresentam comportamento semelhante entre os dados observados (INMET) e de reanálise (ERA5-Land), com predominância de nordeste entre 00 e 11 horas (UTC). No entanto, mostra divergência no intervalo entre 12 e 17 horas (UTC), pois, enquanto os dados de reanálise apontam para ventos predominantemente de nordeste (40%), os dados observados apresentam predominância de leste (25%). No período entre 18 e 23 horas (UTC), os dados indicam predominância de ventos de leste, com frequências em torno de 30% nos dois conjuntos de dados, mostrando, inclusive, uma distribuição mais uniforme nos setores do gráfico. Segundo Costa e Lyra (2012), a tendência de ventos de leste verificada neste intervalo pode ter relação com a brisa marítima presente em regiões litorâneas.

Em Campos dos Goytacazes – São Tomé (Figura 7), verifica-se boa concordância entre os dados observados (INMET) e de reanálise (ERA5-Land) no que diz respeito à direção predominante dos ventos (de nordeste). No entanto, é possível notar que os dados do ERA5-Land superestimaram a frequência dos ventos de nordeste em todos os horários, como, por exemplo, entre 06 e 11 horas (UTC), com frequência dos ventos de nordeste de 27% (INMET) e 43% (ERA5-Land).

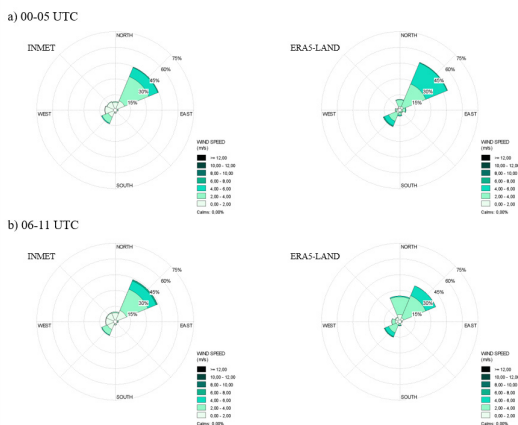


Figura 6 – Rosa dos ventos dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) de 6 em 6 horas (UTC) para Macaé; A. 00-05 UTC; B. 06-11 UTC; C. 12-17 UTC; D. 18-23 UTC



Figura 7 – Rosa dos ventos dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) de 6 em 6 horas (UTC) para Campos dos Goytacazes – São Tomé; A. 00-05 UTC; B. 06-11 UTC; C. 12-17 UTC; D. 18-23 UTC (continuação)

3.3 Série temporal e métricas estatísticas

A Figura 8 mostra a comparação das séries temporais da velocidade média mensal do vento. Através da análise dessas séries nota-se uma boa concordância entre os dados observados (INMET) e os de reanálise (ERA5-Land) ao longo de todo o período analisado. Os dados da reanálise ERA5-Land conseguem reproduzir os ciclos sazonais da velocidade do vento nas duas regiões estudadas, assim como o comportamento geral da série temporal.

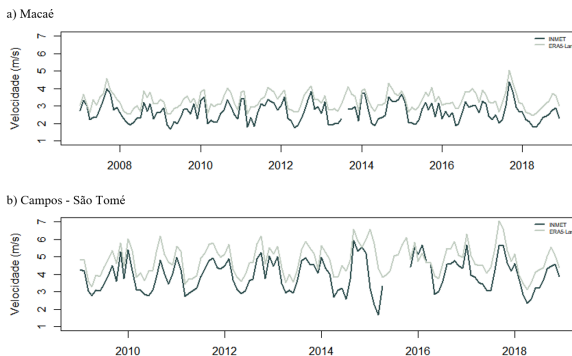


Figura 8 – Série temporal da velocidade média mensal dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land); A. Macaé; B. Campos dos Goytacazes – São Tomé

A Tabela 1 mostra as métricas estatísticas utilizadas para avaliar a qualidade dos dados do ERA5-Land para toda série temporal, assim como na escala sazonal. Na Tabela 2, observam-se as métricas na escala horária. Em todas as escalas analisadas, nota-se que o viés foi positivo, confirmando a tendência dos dados do ERA5-Land a superestimar a velocidade do vento. Em termos da dispersão do erro, expressa pelo EAM, os valores são em torno de 1, considerando toda série temporal (Tabela 1), para ambas as regiões. Vale ressaltar que o EAM indica o afastamento médio absoluto dos dados comparados, apresentando bons resultados quanto mais próximo de zero for o seu valor (STÜKER et al., 2016). No REQM, embora a diferença seja pequena, observa-se que o valor é menor para os dados de Macaé, indicando menor discrepância entre os dados.

Tabela 1 – Métricas estatísticas entre os dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, para toda série temporal e por estação do ano

	Estação do Ano	Viés	EAM	REQM	r
Macaé	SÉRIE TEMPORAL	0,62	1,06	1,37	0,69
	DJF	0,47	0,99	1,27	0,73
	MAM	0,73	1,08	1,38	0,60
	JJA	0,63	0,99	1,32	0,65
	SON	0,67	1,18	1,51	0,70
Campos – São Tomé	SÉRIE TEMPORAL	0,72	1,08	1,48	0,79
	DJF	0,57	1,03	1,43	0,77
	MAM	0,65	1,01	1,39	0,71
	JJA	0,89	1,17	1,54	0,76
	SON	0,78	1,13	1,53	0,81

Na escala sazonal (Tabela 1), de maneira geral, observa-se que as estações do ano com melhor performance dos dados de reanálise, ou seja, as que apresentaram os menores valores de viés, do EAM e da REQM, foram verão (DJF) e inverno (JJA), em Macaé, e verão (DJF) e outono (MAM), em Campos dos Goytacazes – São Tomé. Vale ressaltar que, conforme anteriormente constatado, as menores diferenças entre as médias dos conjuntos dos dados foram observadas no verão.

Na escala horária (6 em 6 horas), as menores dispersões dos erros (EAM), assim como as menores discrepâncias (REQM) dos dados,

foram identificadas entre 06 e 11 horas (UTC) para Macaé, e entre 12 e 17 horas (UTC) para Campos dos Goytacazes – São Tomé (Tabela 2).

No que concerne ao coeficiente de correlação (r) para toda série temporal (Tabela 1), as correlações foram de 0,69 (Macaé) e 0,79 (Campos dos Goytacazes – São Tomé). Em Campos dos Goytacazes – São Tomé, observam-se coeficientes maiores que 0,7 em todas as estações do ano (Tabela 1) e em todos os horários analisados (Tabela 2); já em Macaé, as correlações foram menores, com valor igual ou maior que 0,7 apenas no verão (DJF) e na primavera (SON). Segundo Dancey e Reidy (2006), correlações acima de 0,7 podem ser consideradas fortes e, entre 0,40 e 0,69, moderadas. Todavia, todos os coeficientes mostrados nas Tabelas 1 e 2, foram significativos a 1% pelo teste t de Student ($p < 0,01$).

Tabela 2 – Métricas estatísticas entre os dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, de 6 em 6 horas (UTC)

	Horário UTC	Viés	EAM	REQM	R
Macaé	00h-05h	0,89	1,14	1,49	0,61
	06h-11h	0,64	0,99	1,27	0,64
	12h-17h	0,21	1,07	1,40	0,60
	18h-23h	0,76	1,25	1,59	0,66
Campos - São José	00h-05h	1,03	1,26	1,74	0,75
	06h-11h	0,77	1,07	1,49	0,78
	12h-17h	0,08	1,00	1,35	0,75
	18h-23h	0,99	1,24	1,65	0,75

3.4 Potencial eólico

Para calcular a densidade de potência nas alturas 50 e 100 metros, inicialmente foi extrapolada a velocidade por meio da Equação 8. A Tabela 3 mostra a velocidade média do vento a 10 metros de altura, os valores extrapolados para 50 e 100 metros, bem como as densidades de potência correspondentes, obtidas com a Equação 7.

Cabe salientar que os mais recentes geradores eólicos possuem velocidade de partida (*cut-in*) a partir de 2,5 m/s, quando iniciam a geração de energia, inferindo-se, portanto, que as velocidades médias encontradas neste estudo são favoráveis à produção de energia

edílica, sobretudo em Campos dos Goytacazes – São Tomé, por serem constatados valores geralmente acima dessa média de entrada (LIRA et al., 2011).

Os resultados da Tabela 3, evidenciam a discrepância gerada pelos conjuntos de dados, tendo em vista que uma pequena diferença entre as velocidades médias obtidas remete a grandes diferenças no potencial calculado, considerando a potência cúbica a que esta variável está submetida. Diante disso, o potencial eólico estimado com base nos dados do ERA5-Land atinge, em geral, aproximadamente o dobro do valor obtido quando estimado com base nos dados observados, deixando transparecer uma fragilidade para estudos de aproveitamento eólico.

Tabela 3 – Velocidade média (m/s) e Densidade de Potência (DP) com base nos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, nas alturas de 10, 50 e 100 metros

	Altura (metros)	Velocidade INMET (m/s)	Velocidade ERA5-Land (m/s)	DP INMET (Watts/m ²)	DP ERA5-Land (Watts/m ²)
Macaé	10	2,65	3,31	11,36	22,21
	50	4,06	5,08	41,29	80,70
	100	4,68	5,85	62,88	122,90
Campos - São José	10	3,94	4,81	37,48	68,42
	50	5,74	7,02	116,42	212,50
	100	6,52	7,98	170,44	311,11

As Tabelas 4 e 5 mostram as velocidades médias e as densidades de potência correspondentes nas alturas 50 e 100 metros, na escala sazonal e horária, respectivamente. De maneira geral, observa-se que as velocidades médias em Macaé também foram menores em comparação com as de Campos dos Goytacazes – São Tomé, apresentando as maiores médias na primavera (SON) e no verão (DJF), assim como entre 12 e 17 horas (UTC). Em Macaé, a 100 metros, a maior velocidade média foi de 5,46 m/s (SON) e, em Campos dos Goytacazes – São Tomé, foi de 7,72 m/s (SON), conseqüentemente apresentaram, nesses períodos, as maiores densidades de potência (Tabela 4). As referidas tabelas confirmam, ainda, a discrepância entre as densidades de potência, onde o potencial eólico estimado utilizando os dados do ERA5-Land foi, em alguns casos, aproximadamente o triplo daquele relativo aos dados do INMET, como ocorreu em ambas

as cidades entre 00 e 05 horas (UTC).

Tabela 4 – Velocidade média (m/s) sazonal e Densidade de Potência (DP) sazonal com base nos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, nas alturas de 50 e 100 metros

	Estação do ano	Velocidade INMET (m/s)		Velocidade ERA5-Land (m/s)		DP INMET (Watts/m ²)		DP ERA5-Land (Watts/m ²)	
		50 metros	100 metros	50 metros	100 metros	50 metros	100 metros	50 metros	100 metros
Macaé	DJF	4,48	5,15	5,20	5,99	54,98	83,73	86,23	131,32
	MAM	3,24	3,73	4,38	5,05	20,83	31,73	51,64	78,65
	JJA	3,82	4,40	4,96	5,70	34,18	52,05	74,64	113,67
	SON	4,75	5,46	5,82	6,70	65,55	99,83	120,77	183,92
Campos - São José	DJF	6,55	7,43	7,62	8,65	171,88	251,63	271,17	396,99
	MAM	4,57	5,19	5,76	6,54	58,52	85,67	117,01	171,30
	JJA	5,10	5,79	6,60	7,50	81,12	118,76	176,31	258,11
	SON	6,79	7,72	8,14	9,24	192,15	281,32	330,30	483,56

Tabela 5 – Velocidade média (m/s) horária e Densidade de Potência (DP) horária com base nos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, nas alturas de 50 e 100 metros

	Horário UTC	Velocidade INMET (m/s)		Velocidade ERA5-Land (m/s)		DP INMET (Watts/m ²)		DP ERA5-Land (Watts/m ²)	
		50 metros	100 metros	50 metros	100 metros	50 metros	100 metros	50 metros	100 metros
Macaé	00h-05h	4,48	5,15	5,20	5,99	54,98	83,73	86,23	131,32
	06h-11h	3,24	3,73	4,38	5,05	20,83	31,73	51,64	78,65
	12h-17h	3,82	4,40	4,96	5,70	34,18	52,05	74,64	113,67
	18h-23h	4,75	5,46	5,82	6,70	65,55	99,83	120,77	183,92
Campos - São José	00h-05h	6,55	7,43	7,62	8,65	171,88	251,63	271,17	396,99
	06h-11h	4,57	5,19	5,76	6,54	58,52	85,67	117,01	171,30
	12h-17h	5,10	5,79	6,60	7,50	81,12	118,76	176,31	258,11
	18h-23h	6,79	7,72	8,14	9,24	192,15	281,32	330,30	483,56

É importante destacar que a causa dessa discrepância entre as densidades de potência, como citado anteriormente, é a dependência cúbica da velocidade do vento. Fontenelle (2019) obteve resultado semelhante ao analisar a densidade de potência utilizando a reanálise ERA Interim, constatando que esse banco de dados também superestima os valores de velocidade média e da densidade de potência, em relação aos dados do INMET, para a cidade do Rio de Janeiro e de São Paulo, bem como para outras cidades do Brasil. Rio (2008), ao avaliar a viabilidade da estimativa do potencial eólico em Portugal, verificou que tanto a potência como a velocidade média do vento previstas através das séries de reanálise encontram-se bastante longe dos valores esperados, identificando uma subestimativa sistemática do vento. Assim, tem-se que a qualidade dos resultados não é igual para qualquer ponto do globo, podendo existir locais com melhores ou piores resultados.

É importante ressaltar que não existe um produto de reanálise ou de modelo único que seja melhor em todos os casos (WANG et al., 2011), portanto, outros produtos podem apresentar estimativas melhores nas regiões analisadas. Santos (2019), por exemplo, indica que a utilização de modelos regionais tem gerado resultados satisfatórios no que se refere à simulação da velocidade do vento, com destaque para o *Weather Research and Forecasting* (WRF), um modelo atmosférico de mesoescala, aberto e flexível, comumente utilizado em pesquisa científica e previsão operacional do tempo.

4. CONCLUSÕES

Este estudo consistiu em avaliar a confiabilidade dos dados de vento da reanálise ERA5-Land, visando obter uma avaliação preliminar do potencial eólico no estado do Rio de Janeiro. Para isso, os dados de vento (velocidade e direção) da reanálise ERA5-Land foram comparados com dados de duas estações meteorológicas automáticas do INMET, localizadas em Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que há uma boa concordância entre os dados da reanálise ERA5-Land e os dados observados do INMET, pois conseguem reproduzir os ciclos sazonais da velocidade do vento, assim como o comportamento geral da série temporal, nas duas regiões analisadas. Com relação à direção dos ventos, os resultados foram semelhantes, com predominância de ventos de nordeste na maioria dos casos analisados, com persistência maior no verão (DJF), com frequência em torno de 41% (INMET) e 53% (ERA5-Land) em Macaé, e 45% (INMET) e 67% (ERA5-Land) em Campos dos Goytacazes – São Tomé.

De forma geral, as maiores velocidades (dados observados e reanálise) foram registradas na primavera (SON) e, as menores, no outono (MAM), em ambas as regiões. Na análise horária, o período que apresentou maior concordância entre os dados observados e de reanálise foi entre 12 e 17 horas (UTC), nas duas localidades. Vale ressaltar que, em comparação com Macaé, a estação meteorológica localizada em Campos dos Goytacazes – São Tomé apresentou maiores velocidades em todas as estações do ano e em todos os períodos (horários) analisados.

Com relação à velocidade do vento, é importante destacar a tendência dos dados do ERA5-Land em superestimar os valores, o que gera discrepâncias entre as densidades de potência estimadas, já que a potência eólica é diretamente proporcional ao cubo da velocidade do vento. Algumas estimativas de densidade de potência, utilizando os dados do ERA5-Land, foram aproximadamente o triplo daquelas relativas aos dados do INMET.

Por fim, conclui-se que o ERA5-Land pode ser uma alternativa para regiões nas quais existem dificuldades na obtenção de dados, seja por ausência de medições ou pela baixa qualidade da série observada. No entanto, a utilização desse banco de dados deve ser feita com cautela, sobretudo no que diz respeito ao aproveitamento eólico, sendo necessária a averiguação e adequação da metodologia aplicada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEÓLICA. 2019. Boletim Anual de Geração Eólica. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2020/06/PT_Boletim-Anual-de-Gera%C3%A7%C3%A3o-2019.pdf>. Acesso em: fev. 2021.

AGUIEIRAS JUNIOR, R.L. 2011. Caracterização Preliminar da Direção e Velocidade do Vento na Cidade de Macaé, RJ. Graduação em Engenharia Agrônômica, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Monografia, 112p.

AMARANTE, O.A.C.; ZACK, M.B.J.; SÁ, A.L. 2001. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf>. Acesso em: fev. 2021.

AMARANTE, O. A. C. do; SILVA, F. J. L. da; RIOS FILHO, L. G. 2002. Atlas Eólico do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/AtlasEolicoRJ.pdf>. Acesso em: 09 ago. 2021.

COSTA, G. B.; LYRA, R.F.F. 2012. Análise dos padrões de vento no Estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27(1): 31-38.

DANCEY, C.; REIDY, J. 2006. *Estatística sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows*. Porto Alegre, Editora Artmed, 608p.

DE DEUS, A. E. 2008. *Estudo da Variabilidade do Regime de Ventos do Litoral Norte do Estado do Rio de Janeiro para Geração Eólico-Elétrica*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos, Dissertação de Mestrado, 82.

DE LIMA, F. J. L.; CAVALCANTI, E. P.; SOUZA, E. P.; SILVA, E. M. 2012. Evaluation of the Wind Power in the State of Paraíba Using the Mesoscale Atmospheric Model Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modelling System. *International Scholarly Research Network – ISRN Renewable Energy*, 2012, Article ID 847356, 16 pages, doi:10.5402/2012/847356.

DE MARIA, H. S.; COSTA, A. A.; SOMBRA, S. S. Modelagem Numérica em Alta Resolução para Previsão de Geração de Energia Eólica no Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 23(4): 477-489.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JUNIOR, J. A. 2009. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). *Revista Política Hoje*, 18(1): 115-146.

FONTENELLE, A. L. P. 2019. *Geração Eólica Urbana e Segurança Energética: Uso de Dados de Reanálise Atmosférica para Avaliação do Potencial Preliminar*. Programa de Pós-Graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos, Universidade Estadual de Campinas, Dissertação de Mestrado, 102p.

IPCC. 2011. *Intergovernmental Panel on Climate Change: Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K.C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, R.; JENNE, R.; JOSEPH, D. 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3):437–471.

KRÜGER, E. A. *Análise de Viabilidade Técnica de Turbinas de Vento Canalizado na Geração de Energia Eólica*. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

LIRA, M. A. T.; SILVA, E. M.; ALVES, J. M. B. 2011. Estimativa dos Recursos Eólicos no Litoral Cearense usando a Teoria da Regressão Linear. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26(3): 349-366.

MARIANO, E. B.; CAVALCANTI, E. P.; BESERRA, E. A. 2017. Análise Comparativa da Velocidade do Vento Simulado Pelo BRAMS com Dados Observados e de Reanálises. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(2): 269-276.

MORTENSEN, N. G.; L. LANDBERG, I. T.; PETERSEN, E. L. Wind Atlas Analysis and Application Program (WasP). User's Guide, Ris National Laboratory. Roskilde, 1993.

MUNIZ, R. A.; MENDONÇA, J. C.; ESTEVES, B. S.; MARQUES, V. S.; SOUSA, R. F. 2009. Boletim Informativo das Sociedade Brasileira de Agronomia. Disponível em: <<http://www.sbagro.org/files/biblioteca/2213.pdf>>. Acesso em: ago. 2021.

OLIVEIRA FILHO, R. A.; CARVALHO, V. S. B.; REBOITA, M. S. 2021. Evaluation of the use of GFS analysis data for energy management over Minas Gerais State (Brazil). *Atmósfera*. Disponível em: <<https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/52916>>. Acesso em: set. 2021.

PINTO, L. I. C.; COSTA, M. H.; LIMA, F. Z.; DINIZ, L. M. F.; SEDIYAMA, G. C.; PRUSKI, F. F. 2009. Comparação de Produtos de Precipitação para a América do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24(4): 461-472.

PINTO, L. I. C.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; FISCH, G. F.; LYRA, R. F. F. 2014. Confiabilidade nas Estimativas do Regime de Vento Fornecidas pelo BRAMS no Estado de Alagoas: Influência do Aninhamento e da Resolução Horizontal de Grades. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29(2): 242-258.

RIO, J. F. G. 2008. Estimativas Preliminares do Potencial Eólico na Ausência de Dados de Vento Locais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Dissertação de Mestrado, 183p.

SANTOS, I. G. S. 2019. Previsão da Velocidade do Vento na Escala do Parque Eólico Utilizando o Modelo WRF e Rede Neural Artificial. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Dissertação de Mestrado, 75p.

STUDENT. 1908. The Probable Error of a Mean. *Biometrika Trust*, 6(1): 1-258.

STÜKER, E.; SCHUSTER, C.H.; SCHUSTER, J.J.; SANTOS, D.C.; MEDEIROS, L.E.; COSTA, F.D.; DEMARCO, G.; PUHALES, F.S. 2016. Comparação entre os Dados de Vento das Reanálises Meteorológicas ERA-Interim e CFSR com os Dados das Estações Automáticas do INMET no Rio Grande do Sul. *Revista Ciência e Natura*, 38: 284-290.

TEIXEIRA, L.S.C. 2018. Análise dos Padrões de Vento no Estado do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Ciências Atmosféricas para Engenheiros, Ambientalistas e Educadores, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Monografia, 34p.

TEIXEIRA, W.F.; CAMELO, H.N. 2013. Análise da Densidade de Potência Eólica em Regiões de Serra e Litoral do Estado do Ceará. *Revista Ciência e Natura*, EISSN: 2179-460X, Edição Esp. Dez. 2013: 459-462.

TROEN, I.; E. L. PETERSEN. *European Wind Atlas*. Ris National Laboratory. Roskilde, Denmark, 1989.

WANG, X.; GUO, P.; HUANG, X. 2011. A Review of Wind Power Forecasting Models. *Energy Procedia*, 12:770-778.

WILKS, D.S. 2006. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. International Geophysics Series. California. Academic Press, 649p.