

# AVALIAÇÃO DO MODELO WRF COM FOCO NO PERFIL DE VENTO OFFSHORE MEDIDO POR LIDAR EM PORTO ILHA-RN.

Vanessa de Almeida Dantas – [vanessadantas@isi-er.com.br](mailto:vanessadantas@isi-er.com.br)

Ana Cleide Bezerra Amorim

Nicolas de Assis Bose

Jean Souza dos Reis

Samira de Azevedo Santos Emiliavaca

Luciano André Cruz Bezerra

Leonardo de Lima Oliveira

Maria de Fátima Alves de Matos

Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis ISI -ER

**Resumo.** *Visando identificar regiões propícias para o aproveitamento do recurso energético ao longo da Margem Equatorial Brasileira. Esse artigo é parte de um projeto maior, que abrange a margem equatorial brasileira, notável por sua diversidade geográfica e climática. A coleta convencional de dados eólicos por meio de torres meteorológicas enfrenta desafios logísticos e financeiros, especialmente em áreas de difícil acesso, estimulando a pesquisa de técnicas de sensoriamento remoto, como os LIDARs, que ganham destaque devido à sua versatilidade e capacidade de medição em alturas elevadas. LIDAR instalado nas dependências do porto Salineiro, forneceu as primeiras medições dentre o conjunto de informações que serão adquiridas nesse projeto no âmbito de informações de vento offshore. A avaliação e o desempenho do modelo de mesoescala WRF na representação dos ventos em Porto Ilha-RN, localizado no terminal salineiro de Areia Branca, também foi avaliado. Os resultados revelam um bom desempenho do modelo para a velocidade do vento. Embora as simulações apresentem uma superestimação para representar o ciclo diário do vento, a velocidade média do vento foi bem representada e o modelo WRF reproduziu satisfatoriamente a variabilidade da velocidade do vento para o mês de junho de 2023.*

**Palavras-chave:** Energia Eólica, Camada Limite, LIDAR

## 1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de mapear o potencial energético na Margem Equatorial Brasileira (MEqB) e identificar possíveis áreas de interesse para a exploração desse recurso, estão sendo conduzidos estudos avançados sobre a energia eólica e, por conseguinte, sobre a geração de energia elétrica por meio de fonte eólica offshore ao longo da MEqB. O substancial crescimento da energia eólica em escala global, com um notável aumento na capacidade instalada nos últimos anos, atesta a competitividade e a viabilidade econômica dessa fonte de energia.

O aumento da energia eólica no território nacional teve início gradualmente nos anos 2000; em 2006, o Brasil registrava 12 parques eólicos instalados. Oito anos depois, em 2014, o país alcançou a marca total de 207 parques eólicos. Atualmente, operam no Brasil 734 usinas eólicas (18,87 GW), com mais 334 empreendimentos em construção ou com início previsto, representando um acréscimo de 12,19 GW à matriz elétrica. A energia eólica está consolidada no Brasil, com perspectivas de crescimento tanto na expansão onshore quanto na implementação de projetos offshore.

Discussões atuais indicam uma perspectiva positiva para a utilização da energia eólica offshore no Brasil, com diálogos sobre a criação de marcos regulatórios para o uso do território e o estabelecimento de normas e procedimentos para licenciamento ambiental. Segundo a ANEEL (2021), isso elevará o setor para próximo da marca de 31 GW de capacidade instalada total.

Conforme definido pela ANEEL (2005), a energia eólica é a energia cinética contida nas massas de ar em movimento. Pela conservação de energia, a energia cinética de translação contida nas massas de ar em movimento se converte em energia cinética de rotação quando o vento passa pelas pás do aerogerador eólico.

As informações apresentadas fazem parte de um projeto mais amplo dedicado ao mapeamento da margem equatorial brasileira, destacada por sua diversidade fisiográfica e meteorológica. Essa região abrange o litoral de seis estados brasileiros: Amapá, Pará, Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte, totalizando aproximadamente 2.849 km de extensão (correspondente a 38,6% do litoral brasileiro). Caracterizada por arquipélagos, cabos, baías, lagoas e rios, a região possui uma plataforma continental de largura variável (Dragaud *et al.*, 2020), atingindo seu ponto máximo de 400 km na costa do Pará. Do ponto de vista meteorológico, a área é influenciada por sistemas em grande escala, como os ventos alísios e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), além de sistemas em mesoescala, como as circulações

termicamente induzidas, que incluem brisas terrestres, marítimas, fluviais, entre outras (Souza e Oyama, 2017; Utida *et al.*, 2019).

Enquanto estados como Rio Grande do Norte, Ceará e Piauí apresentam excelentes potencialidades para a instalação de usinas eólicas onshore, Amapá e Pará ainda não se inseriram ativamente no mercado eólico nacional, seja com projetos em terra ou no mar. Pesquisas dessa natureza são essenciais para a continuidade do crescimento do setor de energia no Brasil, atraindo mais investimentos e, conseqüentemente, impulsionando o desenvolvimento econômico da região.

Em sua maioria, a indústria eólica coleta dados de ventos por meio de torres meteorológicas instaladas nos locais onde se planejam construir futuros parques eólicos. No entanto, a instalação dessas torres é desafiadora e envolve custos mais elevados do que algumas tecnologias já disponíveis no mercado, as quais podem ser implementadas em áreas rurais, isoladas e no mar. Nesse sentido, técnicas de sensoriamento remoto, especialmente as tecnologias LiDAR (Light Detection And Ranging), têm ganhado destaque nas pesquisas do setor eólico devido à sua alta capacidade de medir a velocidade dos ventos em grandes regiões, além da flexibilidade em relação ao transporte (Fuentes, 2014) e à capacidade de realizar medições em vários níveis de altura simultaneamente (Goit, 2020).

A execução de projetos como esse contribuirá cientificamente e tecnologicamente para a definição de metodologias a serem utilizadas na avaliação do potencial eólico offshore. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os primeiros dados offshore do projeto da margem equatorial, coletados com tecnologia LiDAR, e compará-los com o desempenho do modelo de mesoescala WRF versão 4.5 na representação dos ventos no Porto Ilha - RN, um dos 7 pontos de medição do projeto MEqB. As simulações de mesoescala foram realizadas em parceria com o Núcleo de Processamento de Alto Desempenho - NPAD, sediado na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, sendo alimentadas com dados de reanálise global do ERA5. As simulações referem-se ao período de junho de 2023, mês em que se iniciaram as medições offshore no porto.

## 2 METODOLOGIA

**Área de estudo.** Localizado em alto mar, Fig. 1 a 14 milhas náuticas da cidade de Areia Branca, no Rio Grande do Norte, encontra-se o Terminal Salineiro de Areia Branca (TERSAB). Construído entre os anos de 1969 e 1974, com o propósito de escoar o sal proveniente das salinas do Rio Grande do Norte para abastecer a indústria química brasileira, o terminal é reconhecido internacionalmente como um dos 10 melhores em todas as áreas da engenharia no mundo. O Porto é um consórcio formado pela parceria entre a Intermarítima e Navenor, que, por meio de leilão, arrendaram o Terminal Salineiro de Areia Branca, tornando-se arrendatárias e operadoras das atividades de exportação de sal do terminal.

Na região do Porto, os ventos predominantes de janeiro a junho são de NE, geralmente fracos; de junho a outubro, ventos fortes de E, que normalmente atingem maior intensidade durante o mês de agosto; em novembro e dezembro, ainda sopram ventos de E, porém, com intensidades reduzidas. A estação chuvosa, conhecida na região como "inverno", estende-se de janeiro a maio.

Na região equatorial, o regime de ventos é dominado pelos ventos alísios, que são fortes, persistentes e predominantemente de leste. Na literatura especializada, encontram-se estudos específicos sobre o vento na CLA, dos quais, em termos de análises observacionais, Fisch (1999) conduziu a primeira análise dos perfis de velocidade do vento. Entre os resultados, destaca-se que a turbulência é maior na estação chuvosa, os ventos são mais intensos durante o dia na estação seca e durante a noite na estação chuvosa, e há uma rotação sazonal de nordeste (época chuvosa) para sudeste (época seca), devido ao posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

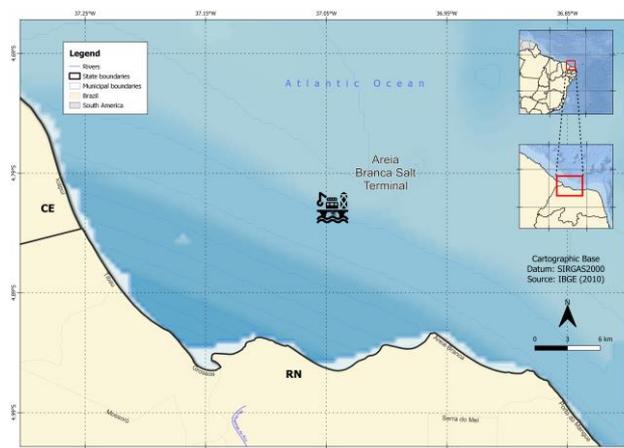


Figura 1 - Mapa de localização Porto Ilha - RN.

Pelas instalações portuárias terrestres existentes na cidade de Areia Branca, o Porto está às margens do rio Mossoró, limitado, ao norte, pela rua Cel. Raimundo Fernandes, a leste, pelo Cemitério São Sebastião e, a oeste, pelo matadouro municipal, distando cerca de 8 milhas, ou 14 km, em linha da costa do Rio Grande do Norte, definida pelas coordenadas geográficas latitude 04° 49' 06" S e longitude 37° 02' 43" W (CODERN - 2023). A metodologia adotada baseou-se na combinação entre a modelagem atmosférica de mesoescala com o modelo WRF versão 4.5 e foi validada com os dados observados a partir de um LIDAR instalado nas dependências do Porto Ilha. Esse tipo de comparação é amplamente utilizado em estudos e pesquisas que utilizam simulações para verificar a habilidade e destreza de modelos atmosféricos.

**Dados:** Um perfilador de vento modelo Zephir ZP300 foi utilizado na campanha de medições, nas alturas de 30, 50, 100, 150 e 200 metros de altura. Este equipamento realiza a medição da velocidade e da direção do vento por meio da detecção do espalhamento do feixe de luz emitido por um emissor contínuo de laser na banda infravermelha.

**Modelagem Atmosférica:** O Modelo WRF-ARW foi desenvolvido por um esforço conjunto de diversos órgãos americanos, entre eles o National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA) e o National Center for Atmospheric Research (NCAR), operado pela University Corporation for Atmospheric Research (UCAR). Foi criado para fins de aplicação tanto em pesquisas como também operacionalmente em Previsão Numérica do Tempo e é considerado o sucessor e uma evolução do modelo MM5. As simulações numéricas são executadas em quatro dimensões (x, y, z, t), uma vez que, a cada passo de tempo, a malha horizontal se replica em todos os níveis verticais. Os níveis verticais são incorporados ao modelo em coordenadas sigma (conforme a Eq. 1), as quais, juntamente com o solo, seguem o contorno do terreno.

$$\eta = \frac{p_h - p_{top}}{p_s - p_{top}} \quad (1)$$

Para qual:  $p_h$  é a pressão em cada nível,  $p_{top}$  é a pressão no topo da atmosfera (constante) e  $p_s$  é a pressão à superfície.  $\eta$  varia de 0 a 1, sendo 0 no topo da atmosfera e 1 na superfície.

A estrutura do modelo consiste em um pré-processamento realizado por meio de um conjunto de programas independentes chamado WPS (WRF Preprocessing System). A saída desse pré-processamento é então encaminhada para o processamento principal (ARW Post), inicialmente pelo programa "real" e, em seguida, para o próprio WRF. Por fim, a saída final do WRF pode ser submetida a um pós-processamento para adotar um formato mais específico a programas de visualização gráfica, como o Phyton, NCL, por exemplo. Uma descrição mais detalhada do modelo WRF está disponível em seu manual, Skamarock *et al.* (2008), e também em Carvalho (2009).

Os dados de entrada utilizados nas simulações foram de reanálises do ERA5 do ECMWF com resolução espacial de (0.25° x 0.25°), aproximadamente 25 km e resolução temporal de 1 em 1 hora para cada ponto de grade. A resolução vertical utilizada foi de 38 níveis, com pressão no topo da atmosfera de 10hPa. A Fig.2 mostra a área de simulação utilizada com resolução no domínio 01 de 3.0 km e o domínio 02 de 1.5km.

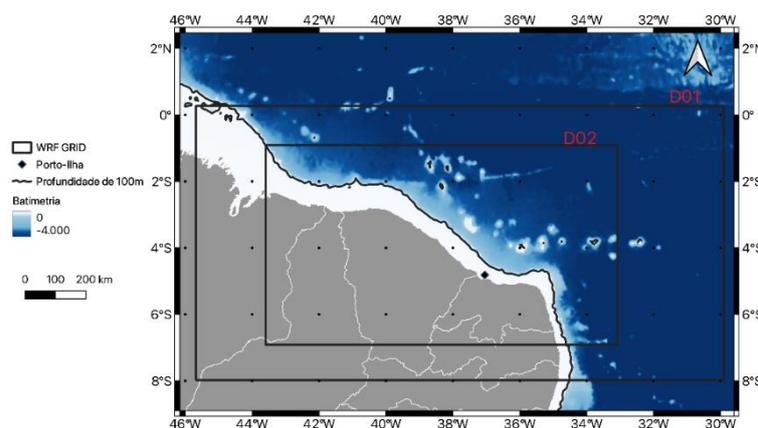


Figura 2 – Área da simulação com o modelo WRF-ARW 4.5.

As simulações abrangeram períodos de 720 horas com saídas a cada 1 hora, sendo as primeiras 24 horas de spin-up, que representa o tempo para ajuste das simulações. Na configuração do modelo WRF podem ser modificadas diversas opções de representação matemática das condições físicas da região de estudo, os esquemas de parametrização física incluem: microfísica, superfície da terra, nuvens, superfície urbana, camada limite planetária, entre outros. A análise de cada uma das parametrizações físicas foge do escopo deste trabalho, por isso, foi analisada apenas o experimento que melhor obteve um valor com significância parametrização pré-configuradas do WRF, por isso, foi analisada apenas uma

das duas “suites” de parametrização pré-configuradas do WRF. Um suite é um conjunto de opções de física que funciona bem em conjunto para uma determinada aplicação (Oracle, 2022)

Tabela 1 – Esquemas de parametrizações utilizados

PARÂMETROS FÍSICOS	TROPICAL SUITE
MP_PHYSICS	6
RA_LW_PHYSICS	4
RA_SW_PHYSICS	4
RADT	5
SF_SFCLAY_PHYSICS	2
SF_SURFACE_PHYSICS	19
BL_PBL_PHYSICS	1
CU_PHYSICS	16

**Métricas Estatísticas.** Os erros sistemáticos e a habilidade do WRF, foram avaliados a partir da raiz do erro médio (BIAS) e uma correlação de acordo com Pearson (2006) foram aplicados aos dados.

O erro médio (BIAS) é definido como a média aritmética do valor absoluto dos desvios para N medidas, e mostra a tendência de erro ou vício dos modelos. Valores acima de 0 indicam superestimativa e valores abaixo de 0 indicam subestimativa dos modelos. O valor ideal é 0. O erro médio individualmente não possui grande relevância, tendo em vista que se houver erros compensatórios, o valor do índice será 0 e ainda assim a previsão será de baixa qualidade. O BIAS é definido pela Eq. (2) abaixo:

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n X_i - Y_i}{n} \quad (2)$$

O Coeficiente de Correlação de Pearson (*r* ou *Cor*) é utilizado para medir a força e direção da relação linear entre os dados observados e a previsão do modelo em reproduzir as magnitudes do vento. Uma alta correlação indica que o modelo capturou eficientemente as variações dos dados observados pelo LIDAR. *Cor* igual a 1 significa uma correlação positiva perfeita, -1 indica uma correlação negativa perfeita, e 0 indica ausência de correlação linear. É obtida pela Eq. (3):

$$Cor = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A magnitude do vento foi simulada em 5 alturas (30,50,100,150 e 200 m) medidas com o LIDAR. Na Fig.3 a média do perfil de vento a 100m para o mês de junho de 2023 é mostrado, enfatizando que as magnitudes nessa altura se apresentam em torno de 7 a 8,0 m.s<sup>-1</sup> na região de estudo.

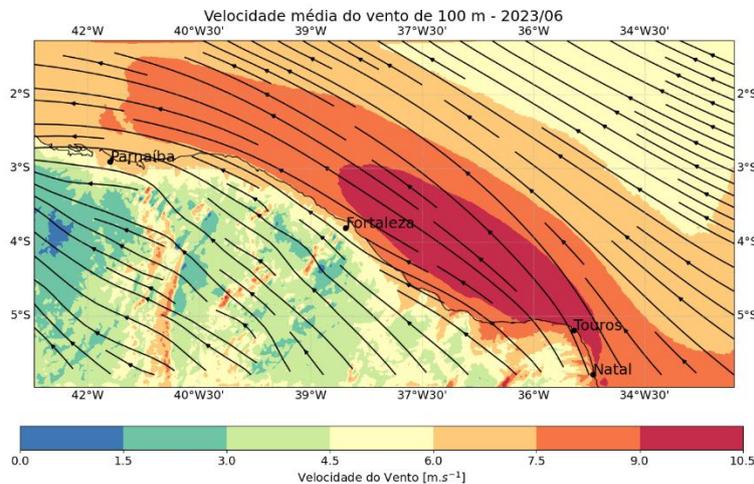


Figura 3 – Padrão de vento para o mês de junho de 2023 em Porto Ilha - RN.

A série temporal em 5 alturas para o mês em questão foram validadas com os dados do Lidar, a Fig.4 mostra a variabilidade do vento nessas alturas.

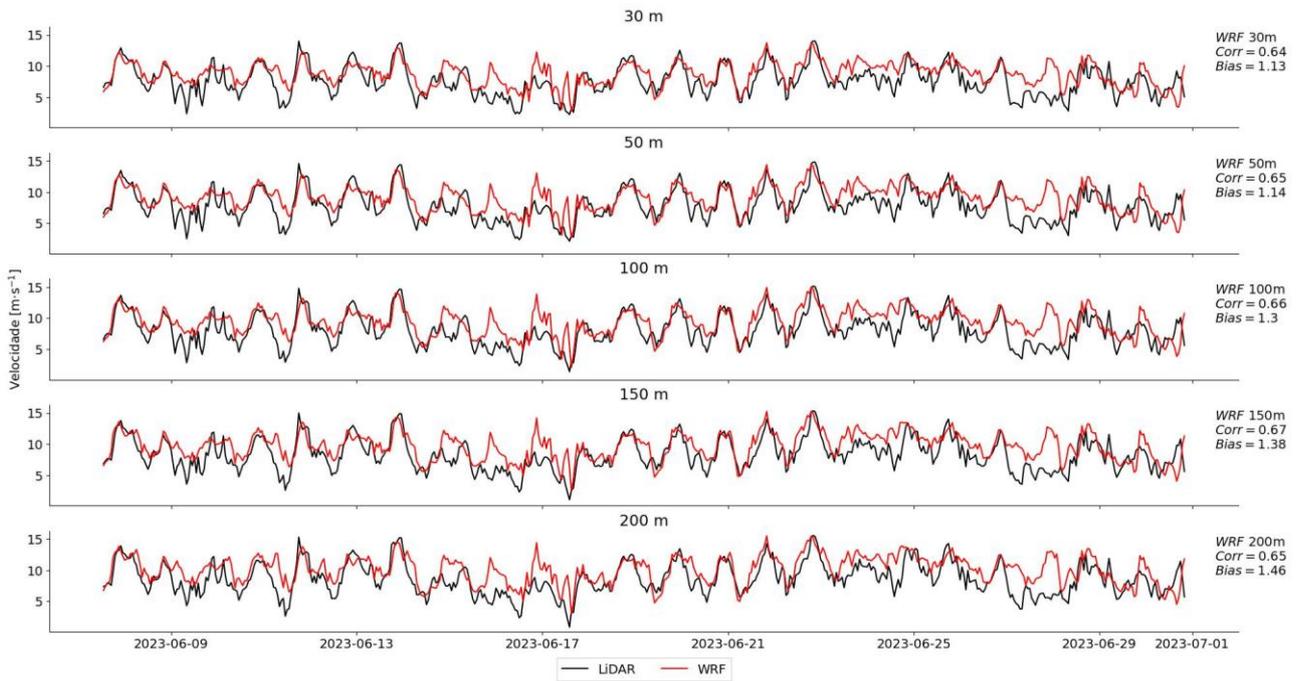


Figura 4 – Série temporal dos dados do LIDAR (linha preta) e simulados pelo modelo WRF (linha vermelha), para junho de 2023 em Porto Ilha - RN.

Os dados simulados com o uso do modelo WRF, mostrou ser uma ferramenta eficaz na validação dos dados de vento. Vale ressaltar que devido à natureza caótica do vento e da limitação computacional moderna, nenhum modelo de previsão consegue realizar previsões da velocidade do vento com 100% de acurácia. Os resultados preliminares mostraram que o modelo capturou a variabilidade do vento em todas as 5 alturas com uma correlação superior a 0,60 nesse primeiro teste de parametrização utilizada.

As melhorias obtidas na parametrização do modelo serão somente válidas para a região e aplicação deste estudo específico. Por isso, é reforçado a importância da identificação de um conjunto apropriado para cada aplicação.

A Fig.5 mostra a média horária da velocidade do vento, em termos horários mesmo sensível no quesito de captar as diferenças na variabilidade, as simulações tenderam a superestimar os dados observados pelo LIDAR, o que pode estar associado ao tipo de parametrização da camada limite, utilizada pelo Tropical Suite.

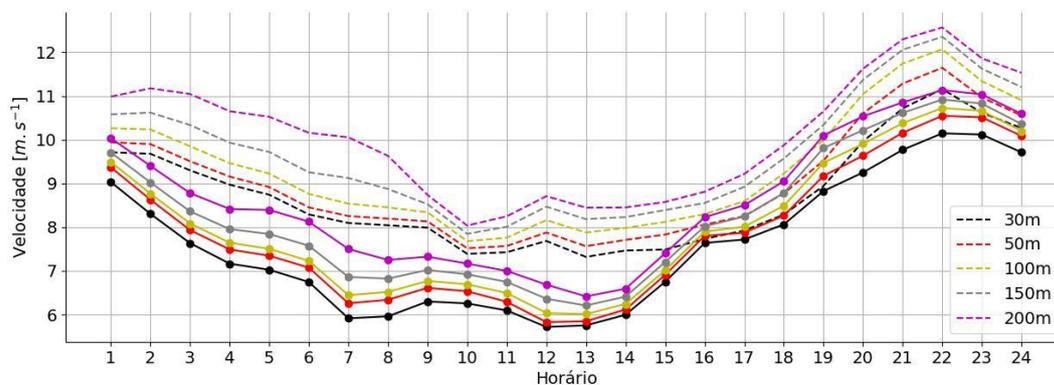


Figura 5 – Média horária dos dados do LIDAR (linha sólida) e simulados pelo modelo WRF (linha tracejada), para junho de 2023 em Porto Ilha – RN.

Destaca-se a velocidade média simulada no período, que se diferiu em torno de apenas 1.3% da velocidade média observada para todas as alturas, como pode ser visualizado na Tab. 2, sendo considerado uma previsão média de excelente

qualidade. Sua acurácia na determinação dos padrões médios da velocidade, além do seu desempenho na identificação da variabilidade do vento reforça a tese de sua qualidade nos prognósticos de mesoescala.

Tabela 2 – Valores da média horária nas cinco alturas analisadas.

Altura	LIDAR (m.s <sup>-1</sup> )	Simulado WRF (m.s <sup>-1</sup> )
30m	7,5850	8,7137
50m	7,8649	9,0069
100m	8,0349	9,3298
150m	8,2895	9,6696
200m	8,6089	10,0738

Os estudos e testes estão em continuidade, com períodos e parametrizações físicas especialmente focadas na camada limite atmosférica da região, uma vez que a variabilidade entre estações desse parâmetro é de suma importância para a adequação do modelo WRF.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação do Brasil (MCTI) pela bolsa de pesquisa no âmbito do projeto “Mapeamento do Recurso Eólico da Margem Equatorial Brasileira”, número de concessão 920008/2021, concedida a primeira autora. O agradecimento ainda se estende ao Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis – Rio Grande do Norte pelo suporte administrativo.

### REFERÊNCIAS

- ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. Banco de Informações da Geração (BIG), 2005 e 2021. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 30 out. 2023.
- Carvalho, DJS. Otimização do modelo numérico de previsão do tempo WRF no contexto de previsão e produção de energia eólica, em Aveiro/Portugal[dissertation]. Aveiro: Universidade de Aveiro; 2009. 53p.
- CODERN – Companhia Docas do Rio Grande do Norte - 2023
- Dragaud, I. C. D. V., da Silva, M. S., de Freitas Assad, L. P., Cataldi, M., Landau, L., Elias, R. N., & Pimentel, L. C. G. (2020). The impact of SST on the wind and air temperature simulations: a case study for the coastal region of the Rio de Janeiro state. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 131(4), 1083-1097. <https://doi.org/10.1007/s00703-018-0622-5>.
- Fisch, G. (1999). Características do perfil vertical do vento no Centro de Lançamento de Foguetes de Alcântara (CLA). *Rev Bras Meteorol*, 14(1), 11–21.
- Fuertes, F. C., G. V. Iungo, and F. Porté-Agel, 2014: 3D turbulence measurements using three synchronous wind lidars: Validation against sonic anemometry. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 31 (7), 1549–1556, <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00206.1>.
- Goit, Jay Prakash, Atsushi Yamaguchi, and Takeshi Ishihara. 2020. "Measurement and Prediction of Wind Fields at an Offshore Site by Scanning Doppler LiDAR and WRF" *Atmosphere* 11, no. 5: 442. <https://doi.org/10.3390/atmos11050442>.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Brasileiro de 2021. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). ORACLE. MAPE (Erro Percentual Absoluto Médio). 2022. Disponível em: [https://docs.oracle.com/cloud/help/pt\\_BR/pbcs\\_common/PFUSU/insights\\_metrics\\_MAPE.htm](https://docs.oracle.com/cloud/help/pt_BR/pbcs_common/PFUSU/insights_metrics_MAPE.htm).
- Pearson, Karl; FISHER, Ronald & INMAN, Henry F. (1994), “Karl Pearson and R. A. Fisher on Statistical Tests: A 1935 Exchange from Nature”. *The American Statistician*, 48,1: 2-11
- Souza D C, OYAMA M D. Breeze potential along the Brazilian northern and northeastern coast. *Journal of Aerospace Technology and Management*, v. 7, n. 3, p. 368–378, 2017.
- Skamarock, W. C. A *et al.*, 2018. Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. NCAR/TN–556+STR NCAR TECHNICAL NOTE.
- Utida, G., CRUZ, F.W., ETOURNEAU, J., BOULOUBASSI, I., SCHEFUß, E., VUILLE, M., NOVELLO, V.F., PRADO, L.F., SIFEDDINE, A., KLEIN, V., ZULAR, A., VIANA, J.C.C. AND TURCQ, B.J. (2019) Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. *Scientific reports*, 9(1), 1698, doi: 10.1038/s41598-018-38003-6.

## **EVALUATION OF THE WRF MODEL WITH A FOCUS ON THE OFFSHORE WIND PROFILE MEASURED BY LIDAR IN PORTO ILHA-RN.**

**Abstract.** *Aiming to identify regions suitable for the use of energy resources along the Brazilian Equatorial Margin. This article is part of a larger project, which covers the Brazilian equatorial margin, notable for its geographic and climatic diversity. Conventional collection of wind data through dangerous towers faces logistical and financial challenges, especially in access areas, stimulating research into remote sensing techniques, such as LIDARs, which gain prominence due to their difficulty and ability to measure at high heights. The LIDAR installed on the premises of the Salineiro port presented as the first question among the set of information that will be acquired in this project within the scope of offshore wind information. The evaluation and performance of the WRF mesoscale model in representing the winds in Porto Ilha-RN, located at the Areia Branca salt terminal, was also evaluated. The results reveal a good performance of the model for wind speed. Although the simulations present an overestimation to represent the daily wind cycle, the average wind speed was well represented and the WRF model satisfactorily reproduced the wind speed variability for the month of June 2023.*

**Keywords:** *Wind Energy, Boundary Layer, LiDAR*