

ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA OFFSHORE DA MARGEM CONTINENTAL BRASILEIRA UTILIZANDO DADOS DO ESCATERÔMETRO ASCAT

Vitor Galazzo de Paiva¹, Milton Kampel¹, Rosio Camayo²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DIOTG). Av. dos Astronautas, 1758 - Sao José dos Campos, SP - 12227-010, vitor.paiva@inpe.br, milton.kampel@inpe.br; ²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DIMNT/CPTEC), Rod. Presidente Dutra, km 40 - Cachoeira Paulista, SP - 12630-000, rosio.camayo@inpe.br

RESUMO

Dados de vento na superfície do mar derivados do escaterômetro ASCAT foram utilizados para estimar o potencial de geração de energia eólica offshore ao longo da margem continental brasileira, para faixas entre a linha de costa e as isóbatas de 50, 100, 150 e 200 m. Três regiões ao longo da margem continental brasileira (NNE, S, SE) se destacaram por apresentar um potencial favorável à implementação de parques eólicos marinhos. Em profundidades de até 50 e 100 m, o potencial de geração de energia eólica offshore foi estimado em 972 e 1251 GW, respectivamente. Considerando somente a faixa de até 50 m de profundidade, o potencial estimado corresponde a mais de 5 vezes que a potência instalada no Brasil somando-se todos os tipos de fontes de geração de energia disponíveis.

Palavras-chave – energia eólica offshore, vento na superfície do mar, ASCAT, sensoriamento remoto, margem continental brasileira.

ABSTRACT

Sea surface wind data derived from the ASCAT scatterometer were used to estimate the potential for offshore wind power generation along the Brazilian continental margin, for strips between the coast and the 50, 100, 150 and 200 m isobaths. Three regions along the Brazilian continental margin (NNE, S, SE) stand out for presenting a favorable potential for the implementation of marine wind farms. At depths up to 50 and 100 m, the potential for offshore wind power generation was estimated at 972 and 1251 GW, respectively. Considering only the range of up to 50 m deep, the estimated potential corresponds to more than 5 times that the power installed in Brazil adding all available types of power generation sources.

Key words – offshore wind power, ocean wind vectors, ASCAT, remote sensing, brazilian continental margin.

1. INTRODUÇÃO

A demanda energética mundial apresenta um expressivo crescimento ao longo dos anos. Em 2021, segundo a empresa de consultoria energética Enerdata [1], o consumo mundial de energia elétrica foi de 24.877 TWh, sendo 47,7% e 25,5% maior em relação aos anos de 2000 e 2010, respectivamente. No entanto, em 2019, 63,1% das fontes energéticas que compõem a produção energética mundial ainda são baseadas

em combustíveis fósseis, contribuindo com a emissão de 33,6 Gt de CO₂ para a atmosfera naquele ano [2]. No contexto atual de mudanças climáticas [3], a busca por fontes renováveis de geração de energia torna-se cada vez mais importante.

Em 2021 no Brasil, a despeito da geração de energia elétrica por fontes renováveis representar mais da metade do total gerado (55,3% hidráulica, 11% eólica e 2,6% solar), foi registrado um aumento de 113,2% da geração elétrica com derivados de petróleo e a queda de 8,5% da geração de eletricidade pela fonte hidráulica [4]. Como a implementação de novas usinas hidroelétricas pode implicar no desmatamento e inundação de grandes áreas, a geração de energia por fonte eólica, segunda mais produzida no país, se destaca como uma alternativa de geração de energia sustentável que apresenta impactos ambientais reduzidos [5, 6].

Atualmente, toda a geração de energia de eólica no Brasil se desenvolve em áreas continentais. Porém, mesmo com um custo de implementação relativamente mais alto, a implementação de parques eólicos em áreas oceânicas (offshore) apresentam vantagens, como por exemplo, uma maior eficiência na geração de energia devido à maior intensidade dos ventos e a não ocupação de áreas costeiras com potencial interesse comercial e turístico [7].

Para se determinar as melhores áreas para a implantação de parques eólicos é necessário um bom conhecimento sobre o comportamento do vento na região de interesse, o que pode ser inferido através de dados de sensores instalados em plataformas orbitais, como os escaterômetros, e de modelos de previsão numérica. Alguns autores já estimaram o potencial de geração de energia eólica offshore para a margem continental brasileira [8–15]. Contudo, Paiva *et al.* [16] realizaram um esforço relativamente extenso de validação de estimativas do vento na superfície do mar (VSM) para a margem continental brasileira, incluindo dados de escaterômetros, modelagem numérica e produtos híbridos. Os autores demonstraram que o escaterômetro orbital *Advanced Scatterometer* (ASCAT), a bordo dos satélites *MÉTéorologie OPérationnelle* A e B (MetOp-A e MetOp-B), apresentou o melhor desempenho estatístico para estimar a intensidade do vento na superfície do mar.

Este trabalho tem como objetivo estimar o potencial de geração de energia eólica offshore na margem continental brasileira utilizando dados ASCAT.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os dados de VSM dos sensores ASCAT foram obtidos da EUMETSAT *Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility* através do *Royal Netherlands Meteorological Institute*. Dois produtos ASCAT de vento a 10 m acima da superfície do mar foram obtidos em nível 2 de processamento, com resolução espacial de 12,5 km: ASCAT/MetOP-A entre 08/2010 - 10/2018 (https://scatterometer.knmi.nl/ascat_a_prod/); e ASCAT/MetOP-B, entre 10/2012 - 10/2018 (https://scatterometer.knmi.nl/ascat_b_osi_co_prod/). Foram também utilizados dados batimétricos ETOPO1 com resolução espacial de 1 minuto de grau, disponibilizados pelo *National Centers for Environmental Prediction* (<https://ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>). Para o cálculo do potencial eólico foi considerada a utilização de turbinas Siemens SWT 150-6MW (Tabela 1).

Potência nominal	6 MW
Diâmetro do rotor	150 m
Área varrida pelo rotor	17860 m ²
Altura do eixo do rotor	100 m
Velocidade mínima de funcionamento	3 m.s ⁻¹
Velocidade máxima de funcionamento	25 m.s ⁻¹

Tabela 1: Especificidades técnicas da turbina Siemens SWT 150-6MW.

A velocidade dos ventos a 10 m (U_{10}) foi extrapolada para a altura do eixo do rotor da turbina (100 m, U_{100}) segundo Smith [17]. Foi calculada a densidade de potência do vento a 100 m (D_{100}) que representa a energia cinética contida pelo vento em um determinado instante e em uma determinada área. A densidade de potência é essencial para a identificação das áreas mais propícias para o aproveitamento da energia eólica, uma vez que só depende das características do próprio vento e não da capacidade de aproveitamento energético de um determinado aerogerador. A potência que pode ser gerada pela turbina Siemens SWT 150-6MW (P_p) e a densidade de potência a 100 m (D_{100}) foram calculadas de acordo com Manwell *et al.* [18], considerando uma grade regular com resolução de 12,5 km. Os valores foram primeiro calculados para cada instante de tempo, ou cada faixa imageada pelo ASCAT, e posteriormente, integrados em médias sazonais (verão DJF, outono MAM, inverno JJA, primavera SON) e anuais (\bar{D}_{100} e \bar{P}_p).

A estimativa do potencial de geração de energia eólica foram obtidas considerando-se faixas entre a linha de costa e as isóbatas de 50, 100, 150 e 200 m, em períodos anuais e sazonais. Foi empregada a metodologia proposta por Silva *et al.* [13], a qual consiste do cálculo da média espacial de \bar{P}_p para a área de interesse (\bar{P}_a), multiplicada pelo número de turbinas que podem ser instaladas nesta área. A obtenção do número de turbinas que podem ser instaladas em determinada área se dá pelo espaçamento das turbinas. Manwell *et al.* [18] propõem um espaçamento de dez vezes o diâmetro do rotor na direção predominante do vento e cinco vezes o diâmetro do rotor na direção perpendicular. Quando conhecida a área ocupada por cada turbina, considerando o espaçamento entre elas, o número ou a densidade de turbinas por unidade de área

(D_t) pode ser estimado. Conhecendo-se \bar{P}_a , D_t e a área da região de interesse (A_r), o potencial de geração de energia eólica pode ser expresso como:

$$P = \bar{P}_a A_r D_t \quad (1)$$

3. RESULTADOS

As velocidades médias anuais a 10 m, \bar{U}_{10} , variaram entre 3,80 e 9,62 m.s⁻¹. Para a altura de 100 m, \bar{U}_{100} variou entre 5,03 e 11,6 m.s⁻¹ (Figuras 1a e 1b). Os valores de \bar{D}_{100} variaram entre 59,4 e 956 W.m⁻² (Figura 1c). Os valores de \bar{P}_p , calculados considerando o uso da turbina Siemens SWT 150-6MW para cada ponto de grade, variaram entre 0,03 e 5,48 MW (Figura 1d), ou muito próximo dos limites de geração deste aerogerador quando consideradas as médias sazonais (em específico durante a primavera), não mostradas neste trabalho.

Ao analisar os mapas de distribuição espacial de \bar{U}_{10} , \bar{U}_{100} , \bar{D}_{100} e \bar{P}_p três regiões destacam-se ao longo da margem continental brasileira, as quais foram demarcadas com linha pontilhada na Figura 1a. A região de maior potencial situa-se entre o leste do Pará e a divisa de RN-PB (Região NNE). Em seguida, destacam-se as regiões entre o Cabo de Santa Marta Grande e Lagoa dos Patos (Região S) e entre o sul do ES e Cabo Frio no RJ (Região SE).

Os maiores valores das velocidades médias foram observados para a Região NNE, com \bar{U}_{10} entre 7,50 e 9,62 m.s⁻¹ e \bar{U}_{100} entre 9,00 e 11,6 m.s⁻¹. O mesmo foi observado para \bar{D}_{100} (461–956 W.m⁻²) e \bar{P}_p (3,21–5,41 MW). Para a Região S, os valores médios anuais são: $\bar{U}_{10} = 7,2-8,3$ m.s⁻¹, $\bar{U}_{100} = 8,03-9,9$ m.s⁻¹, $\bar{D}_{100} = 376-594$ W.m⁻² e $\bar{P}_p = 2,63-4,09$ MW. Para a Região SE, os valores médios anuais são: $\bar{U}_{10} = 5,6-8,0$ m.s⁻¹, $\bar{U}_{100} = 6,7-9,5$ m.s⁻¹, $\bar{D}_{100} = 184-525$ W.m⁻² e $\bar{P}_p = 1,25-3,62$ MW.

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos para o potencial de geração de energia eólica nas quatro faixas ou regiões: até 50, 100, 150 e 200 m de profundidade, e nos cinco períodos considerados: anual, DJF, MAM, JJA, SON. Os valores obtidos para o potencial de geração de energia eólica anual foram de 972, 1251, 1382 e 1441 GW para cada faixa de profundidade, respectivamente. A primavera (SON) é a estação com maior potencial de geração de energia, independentemente da faixa considerada. O outono (MAM) é a estação com menor potencial de geração de energia.

	até 50m	até 100m	até 150m	até 200m
Área (km ²)	353.071	474.898	542.426	568.427
N. Turbinas	313.840	422.132	482.156	505.268
Anual (GW)	972	1251	1382	1441
DJF (GW)	957	1206	1311	1362
MAM (GW)	738	957	1065	1110
JJA (GW)	1015	1317	1471	1537
SON (GW)	1154	1487	1639	1710

Tabela 2: Potencial de geração de energia eólica offshore em diferentes períodos e faixas da margem continental brasileira.

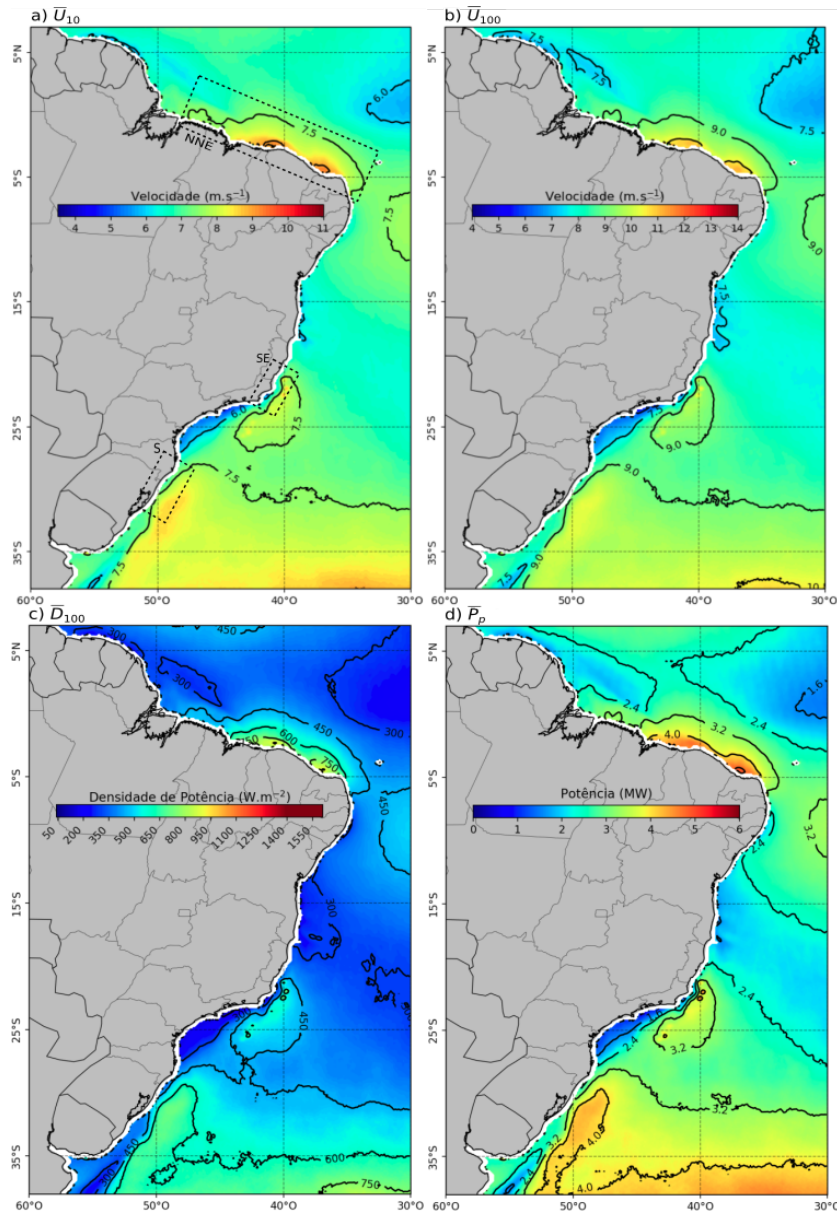


Figura 1: Velocidade média anual do vento a 10 m e demarcação das regiões mais favoráveis ao aproveitamento da energia eólica (\bar{U}_{10}) (a); velocidade do vento extrapolada para a altura de 100 m (\bar{U}_{100}) (b); Densidade de potência média anual para a altura de 100 m (\bar{D}_{100}) (c) e; Potência média anual passível de ser gerada para cada pixel considerando o uso da turbina Siemens SWT 150-6MW (\bar{P}_p) (d).

4. DISCUSSÃO

Os padrões de distribuição da velocidade do vento na margem continental brasileira e as três regiões (NNE, S e SE) com alto potencial de geração de energia eólica *offshore* destacadas no presente estudo concordam, de modo geral, com trabalhos anteriores [8–15].

Ortiz e Kampel [9] utilizaram a mesma metodologia aqui empregada para o cálculo de P , uma base de ventos derivada do escatêmetro orbital SeaWins/QuikSCAT e o uso de uma turbina com altura do eixo do rotor de 80 m e potência nominal de 5 MW. Os autores estimaram um potencial anual de geração de energia eólica igual a 606 GW, considerando a faixa até 100 m de profundidade, portanto, aproximadamente metade do que os 1251 GW aqui estimados (Tabela 2).

Silva *et al.* [13] empregaram a mesma abordagem para o

cálculo de P , a base de dados de vento *Blended Sea Winds* e o uso de um aerogerador similar ao considerado no presente estudo. Os autores estimaram um potencial anual de 1342 GW para a faixa até 50 m de profundidade, ou seja, 370 GW a mais que o potencial aqui estimado (972 GW, Tabela 2).

Sabendo-se que a densidade de potência é proporcional ao cubo da velocidade do vento, se torna fundamentalmente relevante considerar a acurácia nas estimativas da velocidade do vento para os cálculos. Desta forma, o presente trabalho se baseou em uma base de dados de vento validada anteriormente em relação a dados *in situ* [16]. Esta abordagem agrega confiabilidade às estimativas do potencial de geração de energia eólica *offshore* como aqui apresentadas.

Outra questão relevante é que Ortiz e Kampel [9] e Silva *et al.* [13] consideraram a estratificação atmosférica como neutra, adotando um valor constante para parametrizar a

altura da rugosidade na superfície do mar para a extrapolação do vento em altitude. No presente estudo, consideramos a estratificação atmosférica como neutra, mas calculamos a altura da rugosidade da superfície do mar em função da tensão de cisalhamento do vento, densidade e viscosidade do ar [17].

Um outro estudo reportado por Pimenta *et al.* [15], utilizou a base de dados *Blended Sea Winds* e considerou a instabilidade atmosférica para a extrapolação do vento em altitude. Os autores estimaram um potencial anual de geração de energia eólica *offshore* de 983 e 1346 GW nas faixas de até 50 e 100 m de profundidade, i.e., bem próximo dos valores estimados no presente estudo (diferenças de $\approx 1\%$ e 7%).

Cabe ressaltar que os potenciais de geração de energia eólica estimados neste estudo e anteriores reportados na literatura devem ser considerados com alguma cautela, uma vez que não excluíram dos cálculos as áreas protegidas por Unidades de Conservação, outras áreas que possam apresentar uma topografia de fundo desfavorável à instalação destes empreendimentos ou ainda, com intenso tráfego marítimo, entre outras potenciais limitações.

5. CONCLUSÕES

No presente estudo, apresentamos a distribuição espacial do vento derivada do escaterômetro ASCAT a 10 m e a 100 m da superfície do mar, calculamos a densidade de potência a 100 m e estimamos o potencial de geração de energia eólica *offshore* anual e sazonal, considerando diferentes faixas de profundidade e o uso da turbina Siemens SWT 150-6MW. Também foram apresentadas estimativas do potencial de geração de energia eólica *offshore* em faixas de até 50, 100, 150 e 200 metros de profundidade na margem continental brasileira, para diferentes períodos, anual e estações do ano.

Foram identificadas três regiões com maior potencial (do maior para o menor) localizadas entre o leste do Pará e a divisa RN-PB, entre o Cabo de Santa Marta Grande (SC) e Lagoa dos Patos (RS), e entre o sul do ES e Cabo Frio (RJ). O potencial anual estimado equivale a 972, 1251, 1382 e 1441 GW nas faixas de até 50, 100, 150 e 200 m de profundidade, respectivamente. O potencial anual estimado para a faixa até 50 m supera em mais de 5 vezes a potência (ou capacidade) instalada no Brasil [4]. A primavera (SON) é a estação do ano com maior potencial de geração de energia (1154 GW até 50 m), enquanto o outono (MAM) é a com menor potencial nesta mesma faixa de profundidade (738 GW).

Considerar a instabilidade atmosférica na extrapolação do vento em altitude e no cálculo do potencial de geração de energia pode contribuir com a acurácia das estimativas. Estudos futuros devem ainda avaliar em maior detalhe a viabilidade técnica e econômica de instalação de parques eólicos *offshore* nas regiões com maior potencial de geração de energia. Análises robustas de impacto ambiental também devem ser desenvolvidas, considerando a sazonalidade associada aos recursos biológicos nas regiões de interesse para prevenir ou mitigar possíveis impactos negativos.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Enerdata. *Global Energy Statistical Yearbook*. Enerdata, 2022.
- [2] Key world energy statistics, 2021.
- [3] Zhu Zhongming, Lu Linong, Yao Xiaona, Zhang Wangqiang, Liu Wei, et al. Ar6 synthesis report: Climate change 2022. 2022.
- [4] Fact Sheet: Anuário estatístico de energia elétrica 2022, 2022.
- [5] R Saidur, NA Rahim, MR Islam, and KH Solangi. Environmental impact of wind energy. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(5):2423–2430, 2011.
- [6] Suaad Jaber. Environmental impacts of wind energy. *Journal of Clean Energy Technologies*, 1(3):251–254, 2013.
- [7] SC Pryor and RJ Barthelmie. Comparison of potential power production at on-and offshore sites. *Wind Energy*, 4(4):173–181, 2001.
- [8] Felipe Pimenta, Willett Kempton, and Richard Garvine. Combining meteorological stations and satellite data to evaluate the offshore wind power resource of southeastern brazil. *Renewable Energy*, 33(11):2375–2387, 2008.
- [9] GP Ortiz and M Kampel. Potencial de energia eólica offshore na margem do brasil. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*, 2011.
- [10] Hugo Miguel Pedro Nunes. Avaliação do potencial eólico ao largo da costa nordeste do brasil. Mestrado em geociências aplicadas, Universidade de Brasília, 2012.
- [11] Arthur Gerard Quadros de Souza, Felipe Mendonça Pimenta, Allan Rodrigues Silva, Ewerton Cleudson Sousa Melo, Mário Pereira da Silva, Marco Ianniruberto, and Hugo Miguel Pedro Nunes. North and Northeast Brazil offshore wind power. In *Anais do XIII Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica*, pages 159–163. Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 2014.
- [12] Danielle K S Lima, Ruth P S Leão, Antônio C S dos Santos, Francisca D C de Melo, Vinícius M. Couto, Aurélio W T de Noronha, and Demercil S. Oliveira. Estimating the offshore wind resources of the State of Ceará in Brazil. *Renewable Energy*, 83:203–221, 2015.
- [13] Allan Rodrigues Silva, Felipe Mendonça Pimenta, Arcilan Trevenzoli Assireu, and Maria Helena Constantino Spyrides. Complementarity of brazil's hydro and offshore wind power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56:413–427, 2016.
- [14] Ana Garcia Corrêa. Climatologia dos ventos e potencial eólico offshore de santa catarina. Mestrado em oceanografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- [15] Felipe M Pimenta, Allan R Silva, Arcilan T Assireu, Vinicio de S e Almeida, and Osvaldo R Saavedra. Brazil offshore wind resources and atmospheric surface layer stability. *Energies*, 12(21):4195, 2019.
- [16] Vitor Paiva, Milton Kampel, and Rosio Camayo. Comparison of multiple surface ocean wind products with buoy data over blue amazon (brazilian continental margin). *Advances in Meteorology*, 2021, 2021.
- [17] Stuart D Smith. Coefficients for sea surface wind stress, heat-flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature. *Journal of Geophysical Research*, 93(C12):15467–15472, 1988.
- [18] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers. *Wind Energy Explained*. 2009.