

## **Análise da densidade de potência eólica offshore na costa Maranhense**

### **RESUMO**

Este estudo fornece informações sobre a densidade de potência das condições eólicas *offshore* na costa Maranhense com implicações significativas para a implementação de projetos de energia eólica *offshore*. A relação entre a potência eólica e a velocidade do vento é essencial para entender a capacidade de geração de energia nessa área, para isso utilizamos dados das componentes  $u$  e  $v$  do vento de 1979 a 2020 em uma altura de 100m provenientes da reanálise ERA5. Os resultados encontrados destacam que os meses de junho a novembro são altamente favoráveis para a geração de energia eólica, com densidades de energia atingindo até  $800 \text{ W/m}^2$ , com um pico notável de setembro a novembro. Além disso, variações regionais são identificadas, com destaque para uma área próxima aos Lençóis Maranhenses, que apresenta densidade de energia excepcionalmente alta de cerca de  $850 \text{ W/m}^2$ . Essas descobertas são cruciais para orientar estratégias de planejamento energético, alocando eficientemente recursos e explorando ao máximo o potencial de geração de energia eólica *offshore*. Além disso, promovem a transição para fontes de energia mais sustentáveis, contribuindo para o desenvolvimento sustentável e a redução das emissões de carbono.

Palavras-chave: Eólica *offshore*, Porto do Itaqui, Maranhão.

### **Abstract**

This study provides information on the power density of offshore wind conditions on the Maranhão coast with significant implications for the implementation of offshore wind energy projects. The relationship between wind power and wind speed is essential to understand the energy generation capacity in this area. To do this, we use data on the  $u$  and  $v$  components of the wind from 1979 to 2020 at a height of 100 million from the ERA5 reanalysis. The results found highlight that the months from June to November are highly developed for wind energy generation, with energy densities reaching up to  $800 \text{ W/m}^2$ , with a notable peak from September to November. Furthermore, regional variations are identified, with emphasis on an area close to Lençóis Maranhenses, which has a high specific energy density of around  $850 \text{ W/m}^2$ . These findings are crucial for guiding energy planning strategies, efficiently allocating resources and fully exploiting the potential of offshore wind energy generation. Furthermore, they promote a transition to more sustainable energy sources, contributing to sustainable development and the reduction of carbon emissions.

Key words: Offshore wind, Porto do Itaqui, Maranhão.

## 1. INTRODUÇÃO

À medida que o mundo enfrenta uma crescente crise climática e busca soluções para mitigar seus impactos adversos, a indústria portuária emerge como um protagonista fundamental nesse cenário. Os portos, sendo alicerces do comércio global e da logística, desempenham um papel crucial tanto na economia mundial quanto na nacional (WANG et al., 2020) . Isso ocorre devido ao fato de que uma parcela significativa das mercadorias destinadas à exportação passa pelos portos (BECKER et al., 2018; NOTTEBOOM; PALLIS; RODRIGUE, 2021). Essa considerável movimentação de cargas marítimas não apenas impulsiona o comércio internacional, mas também exerce um impacto substancial no Produto Interno Bruto (PIB) do país (2021)(ANTAQ, 2021).

No entanto, é importante destacar que esse setor apresenta uma considerável pegada de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Diante dessa realidade, a Organização Marítima Internacional (OMI), alinhada com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela ONU, estabeleceu metas ambiciosas. Até 2030, a OMI visa uma redução de 20 a 30% nas emissões de GEE em relação aos níveis de 2008. Para o horizonte de 2050, a meta ainda mais ousada é alcançar a neutralidade de emissões. Esse contexto impulsionou uma corrida em busca de soluções inovadoras para acelerar a transição em direção a uma economia mais sustentável e reduzir drasticamente as emissões de gases de efeito estufa.

Nesse contexto, é pertinente mencionar a crescente relevância da energia eólica, tanto *onshore* quanto *offshore*, que se apresenta como uma solução promissora e se distingue como uma fonte de energia abundante, segura e ecologicamente sustentável para a geração de eletricidade, respaldada por estudos de Nunes (2020) e González et al. (2017).

É notável que esse setor tem experimentado um expressivo crescimento em escala global, sendo impulsionado pela constante redução dos custos associados, conforme ressaltado por Shi et al. (2015). De acordo com dados da IRENA (2023), essa capacidade instalada cresceu 98 vezes, passando de 7,5 GW em 1997 para aproximadamente 733 GW em 2018. A capacidade eólica *onshore* aumentou de 178 GW em 2010 para 699 GW em 2020, enquanto a capacidade eólica *offshore* cresceu de forma mais acentuada, embora a partir de uma base menor, saindo de 3,1 GW em 2010 para 34,4 GW em 2020. A produção total de energia eólica cresceu substancialmente, aumentando 5,2 vezes entre 2009 e 2019, alcançando a marca de 1.412 TWh.

Nesse cenário de rápida transformação rumo à energia sustentável, o setor portuário e marítimo do Brasil está tomando medidas concretas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Um exemplo notável é a criação do Grupo de Trabalho de Negócios Oceânicos, uma iniciativa do Pacto Global da ONU que tem como principal objetivo impulsionar a descarbonização de portos e transportes marítimos (FIRJAN, 2023). O Porto do Itaqui, que desempenha um papel fundamental nas atividades comerciais do estado do Maranhão e do Brasil como um todo e que também é um dos signatários do Pacto Global da ONU – Organização das Nações Unidas (EMAP, 2023), está firmemente engajado em busca de soluções sustentáveis, sua infraestrutura estratégica torna-o um ator central nessa jornada em direção a práticas mais responsáveis e ambientalmente conscientes.

Neste estudo, temos como objetivo principal avaliar a densidade de potência eólica *offshore* na costa do Maranhão, com foco especial nas áreas mais próximas ao Porto do Itaqui. Através da análise de fatores como padrões de vento, densidade de energia eólica, e climatologia, pretendemos fornecer *insights* valiosos sobre a discussão na implementação de uma usina de energia eólica *offshore* nessa região. Além disso, esta pesquisa poderá contribuir para a crescente discussão sobre a transição energética e seus impactos no contexto regional, nacional e global.

Ao longo deste trabalho, detalharemos a metodologia empregada na análise, discutiremos a relevância dos resultados obtidos e destacaremos como essa pesquisa pode influenciar positivamente o desenvolvimento sustentável do Porto do Itaqui, do Maranhão e, por extensão, do Brasil. A energia eólica *offshore* representa não apenas uma alternativa viável, mas também uma oportunidade de contribuir para o processo de descarbonização do setor portuário fortalecendo os corredores verdes do transporte marítimo promovendo uma navegação com zero emissão de GEE.

## **2. MARCO CONCEITUAL**

À medida que os desafios ambientais se tornam cada vez mais evidentes, e as consequências das mudanças climáticas, da degradação dos ecossistemas e do esgotamento de recursos naturais se tornam mais tangíveis, a busca por alternativas sustentáveis e modelos econômicos mais responsáveis ganha urgência. Esta era pós-crise econômica dos anos de 2007 e 2008 não apenas levantou questões cruciais sobre a viabilidade a longo prazo do sistema econômico vigente, mas também inspirou um movimento global em direção a uma transformação profunda na maneira como produzimos, consumimos e vivemos.

Durante a 21ª Conferência do Clima (COP 21) foi estabelecido um novo acordo global com o propósito de combater os efeitos das mudanças climáticas e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Este acordo, conhecido como Acordo de Paris, foi ratificado por todas as 195 partes signatárias da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Um dos principais objetivos delineados nesse contexto é a manutenção do aumento da temperatura global muito abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, com esforços adicionais voltados para limitar esse aumento a apenas 1,5°C (FALKNER, 2016).

Como signatário do acordo internacional, o Brasil assumiu um compromisso significativo em relação à redução das emissões de gases de efeito estufa. A meta estabelecida é reduzir as emissões em 37% em relação aos níveis de 2005 até o ano de 2025, com uma ambição ainda maior para 2030, almejando uma redução de 43% em relação ao mesmo ano-base (MMA, 2017). Além dessas metas de redução de emissões, o Brasil também se comprometeu a aumentar a parcela de energias renováveis em sua matriz energética. O objetivo é alcançar uma significativa participação de 45% de fontes renováveis na composição da matriz até 2030. Isso implica em um substancial aumento na geração de energia a partir de fontes como eólica, solar e biomassa (MMA,

2017). Esse compromisso representa uma transição importante em direção a uma matriz energética mais limpa e sustentável, contribuindo para um futuro mais verde e resiliente.

Nos últimos tempos, tem sido notável o crescente destaque nas agendas científicas, tecnológicas e políticas em todo o mundo quando se trata de promover fontes de energia alternativas que tenham um impacto ambiental reduzido. Este movimento tem como objetivo principal viabilizar o desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis para atender às crescentes demandas energéticas globais. Nesse contexto, a evolução da energia *eólica offshore* emerge como uma opção altamente atrativa para a geração de eletricidade. Ela se destaca por sua pegada ambiental sustentável e também por sua competitividade de custos quando comparada a outras fontes de energia, sejam elas renováveis ou fósseis (IRENA, 2018).

No contexto do planejamento energético de longo prazo, estabelecido pelo Plano Nacional de Energia (PNE) em alinhamento com a Política Energética Nacional (PEN), é notável o destaque concedido ao papel da energia eólica offshore no Brasil no PNE 2030. Este plano ressalta a importância de uma avaliação criteriosa dessa fonte de energia. A continuidade desse enfoque é perceptível no desenvolvimento do próximo PNE 2050, que atualmente está em processo de elaboração. Nesse sentido, é recomendada a inclusão da energia eólica offshore nos estudos que exploram diversos cenários de oferta de energia elétrica no país. Vale destacar que, até o momento, a geração de eletricidade a partir da energia eólica no Brasil está restrita a usinas onshore, uma vez que ainda não estão em operação usinas offshore no país (NUNES, 2020). No entanto, o Brasil apresenta um extenso litoral com vasto potencial eólico inexplorado.

Estudos como o de Ortiz e Kampel (2011) indicam o expressivo potencial eólico no mar territorial (até 12 milhas náuticas da costa) e na zona econômica exclusiva (ZEE) brasileira (até 200 milhas náuticas da costa), com isso também podemos destacar a região nordeste do Brasil que apresenta um grande potencial eólico (REIS, 2001). Pimenta et al. (2008) conduziram um estudo com o propósito de avaliar os recursos de energia eólica offshore na região sudeste do Brasil. Em uma abordagem similar, Lima et al. (2015a) realizaram uma pesquisa para avaliar o potencial eólico *offshore* ao longo do litoral do Estado do Ceará, também no Brasil.

No que diz respeito ao potencial eólico offshore no Brasil, um dos primeiros estudos a mapear essa capacidade foi realizado por Ortiz e Kampel (2011). Este estudo abrangeu toda a extensão da costa brasileira durante o período de agosto de 1999 a dezembro de 1999. Os resultados da pesquisa revelaram que a média de velocidade do vento offshore variou entre 7 m/s e 12 m/s a uma altitude de 80 metros acima do nível do mar, evidenciando o considerável potencial eólico na região costeira brasileira. O estudo destacou três áreas com ventos de alta intensidade: costa de Sergipe e Alagoas; na região costeira do Rio Grande do Norte e Ceará; ao longo da costa do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Além disso, em relação à densidade média de potência,

foram registradas variações significativas, abrangendo uma faixa que vai de 215 W/m<sup>2</sup> a 968 W/m<sup>2</sup>.

Outro estudo feito por Silva (2019) também avaliou o potencial eólico *offshore* do Brasil. Os resultados encontrados por Silva (2019) apontam potencial teórico *offshore* do Brasil é de 1.687,6 GW; o potencial técnico de 1064,2 GW; e o potencial ambiental e social, mais restrito, de 330,5 GW, isso equivale a 21,3 vezes a capacidade instalada da energia eólica *onshore* no Brasil em 2020 ANEEL (2020). Esse mesmo autor também pontua as áreas destaques para implementação de usinas eólicas *offshore* no Brasil. Sendo elas: litoral do Norte e Nordeste do Brasil, entre os estados do Pará e do Rio Grande do Norte, e no litoral Sul, em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul, juntas somam uma capacidade instalável de 126 GW.

Além de toda essa potencialidade de geração de energia eólica *offshore* oferece no litoral brasileiro, com destaque para o litoral Norte e Nordeste, podemos citar umas das vantagens da implantação de usinas eólicas *offshore*, como por exemplo: maior velocidade do vento em comparação com as regiões continentais (ESTEBAN et al., 2011; MATTAR; BORVARÁN, 2016; NAGABABU et al., 2017) menores flutuações e turbulência devido à ausência de barreiras físicas (LIMA et al., 2015b; NAGABABU et al., 2015, 2017) e maior espaço disponível, permitindo a instalação de turbinas eólicas e parques eólicos maiores (CARVALHO et al., 2014; GOMES et al., 2019).

Em termos gerais, os ventos oceânicos apresentam uma velocidade média aproximadamente 20% superior àquela observada em áreas terrestres, o que se traduz em uma capacidade de produção de energia consideravelmente mais elevada. As instalações de geração de energia eólica *offshore*, por conseguinte, conseguem gerar até 70% a mais de eletricidade quando comparadas aos parques eólicos *onshore* (CARVALHO, 2017).

O nordeste brasileiro é uma região que se destaca pela intensidade, continuidade e constância dos ventos alísios. Esses ventos são influenciados pela localização geográfica favorável dessa parte do país, que se encontra próxima à Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) definida como um cinturão tropical de nuvens convectivas (WALISER e GAUTIER, 1993), que tem sua posição média variando sazonalmente de 9° N a 2° N sobre o Oceano Atlântico (SCHNEIDER et al., 2014), e é formada pela confluência dos ventos alísios de sudeste e nordeste (MELLO et al., 2005) e à Zona de Alta Pressão do Atlântico Sul. Esses fatores meteorológicos únicos tornam o nordeste brasileiro uma das áreas mais promissoras para a geração de energia eólica no Brasil. Durante os meses de agosto e setembro, a ZCIT retorna em direção ao equador, ocorre uma intensificação dos ventos alísios devido ao aumento no gradiente de pressão atmosférica.

O Porto do Itaqui que está localizado no Nordeste Brasileiro, é caracterizado por águas profundas e possui um posicionamento geográfico estratégico e privilegiado que atende, além do Nordeste, as regiões do Norte e do Centro-Oeste (PDZ ITAQUI, 2019). É um dos maiores portos do Brasil e líder no Arco norte em exportação de soja, e segundo maior da região em embarque

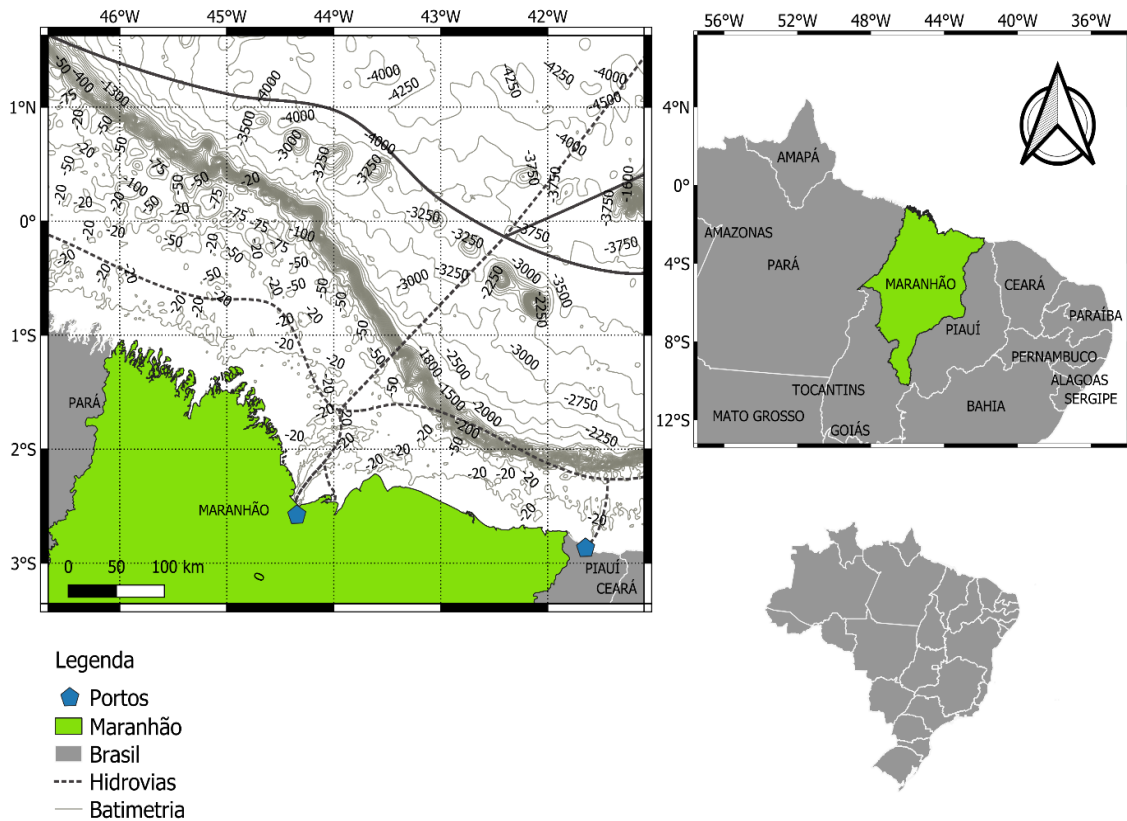
de milho (PAKULSKI, 2021). Na temática da descarbonização, o Porto do Itaqui, sob a administração da Empresa Maranhense de Administração Portuária - EMAP, destaca-se como um dos pioneiros entre os portos públicos do Brasil a implementar um programa abrangente de descarbonização. Este programa tem como objetivo principal a redução das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a mitigação dos impactos das mudanças climáticas (EMAP,2023). O planejamento estratégico adotado pelo Porto do Itaqui se baseia em quatro pilares fundamentais, que guiam suas iniciativas nesse caminho rumo à sustentabilidade:

- **Metas e Estratégias para Redução de Emissões:** O primeiro pilar concentra-se na definição de metas ambiciosas e estratégias concretas para a redução das emissões de gases poluentes. Isso implica em estabelecer objetivos claros e mensuráveis, bem como adotar práticas que minimizem o impacto ambiental das operações portuárias.
- **Smart Ports (Inovação e Tecnologias de Controle Inteligente):** O segundo pilar destaca a importância da inovação e da aplicação de tecnologias avançadas para o controle inteligente das operações portuárias. Isso não apenas melhora a eficiência das atividades, mas também permite a redução das emissões por meio da otimização dos processos logísticos e do uso eficiente dos recursos.
- **Boas Práticas com Programas, Agendas e Intercâmbios:** O terceiro pilar enfatiza a promoção de boas práticas no âmbito portuário, por meio da implementação de programas específicos e do estabelecimento de parcerias e intercâmbios com outras entidades. A troca de experiências e conhecimentos desempenha um papel crucial na busca por soluções mais sustentáveis.
- **Novas Fontes e Combustíveis (Substituição da Matriz Energética):** Por fim, o quarto pilar aborda a exploração de novas fontes de energia e a transição para combustíveis mais limpos. Isso inclui a avaliação de alternativas de matriz energética e a consideração de fontes renováveis, visando a redução da pegada de carbono das operações portuárias.

## METODOLOGIA

### *Área de Estudo*

A área de estudo deste trabalho está localizada na região Nordeste do Brasil, especificamente no litoral estado do Maranhão (Figura 1). O Maranhão possui uma área territorial de 329.555,8 km<sup>2</sup> e está localizado entre as coordenadas de 01°01'S a 10°21'S e de 48°40'W a 41°48'W. Sua variabilidade climática é considerada semi-anual com uma estação chuvosa de dezembro a maio, e uma estação seca de junho a novembro (SILVA et al., 2017; NASCIMENTO et al., 2017). Em virtude de sua extensão, posição geográfica e feições fisiográficas, o estado do Maranhão possui uma distribuição de chuvas irregular, com os maiores índices pluviométricos concentrados na região norte do estado, além de ser afetada pelos sistemas atmosféricos como a ZCIT.



**Figura 1** - Domínio espacial do litoral Maranhense. Em verde, a localização do estado do Maranhão.

### *Dados da Reanálise Oceânica ERA5*

A reanálise ERA5 é um produto implementado pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) e desenvolvido pelo Copernicus Climate Change Service (HERBACH, et al., 2018). Essa reanálise disponibiliza uma grande quantidade de variáveis atmosféricas e oceânicas, e é sucessor do ERA-Interim. Possui frequência horária de dados e resolução espacial de 31 km (HERSBACH et al., 2020). A resolução horizontal de 0,25° (31 km) e 137 níveis em coordenadas sigma possibilita ao ERA5 capturar detalhes dos fenômenos atmosféricos, diferentemente do que é observado nas reanálises globais de resoluções mais baixas, além de simular muito mais conjuntos de dados reprocessados (THÉPAUT et al., 1996; CUNHA, 2019). A escolha dessa base de dados é justificada pelo seu bom desempenho demonstrado por vários trabalhos, como, Trolliet et al. (2018) e Urraca et al. (2018). Trabalhos como o de Graham et al., 2019 e Tetzner et al., 2019 também demonstraram que o ERA5 apresentou boa representação de ventos, temperatura e umidade em baixo e em altos níveis. Os dados da reanálise ERA5 podem ser acessados através do endereço eletrônico <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>. Neste trabalho foram utilizados dados mensais da reanálise ERA5 dos componentes horizontais e verticais do vento a 100m, para o período de janeiro de 1979 a dezembro de 2020 para o domínio do litoral maranhense (Figura 1).

### *Densidade de energia eólica*

O cálculo *Wind Power Density* (WPD) oferece uma medida teórica simplificada para avaliar a capacidade de geração em uma determinada região. Como uma abordagem inicial, é altamente conveniente identificar os pontos críticos na área de estudo. O WPD representa o fluxo de energia cinética por unidade de área do vento, o qual pode ser expresso utilizando a Equação (1) e é amplamente empregado na análise de energia eólica. O valor da densidade do ar ( $\rho$ ) pode ser aproximado a 1,225 kg/m<sup>3</sup>, uma consideração que já foi adotada em numerosos estudos prévios (GOMES et al., 2029; PIMENTA et al., 2008; SILVA et al., 2016) e onde  $\bar{v}$  refere-se à velocidade média do vento.

$$WPD = \frac{1}{2} \rho \bar{v}^3 \quad (1)$$

## **RESULTADOS**

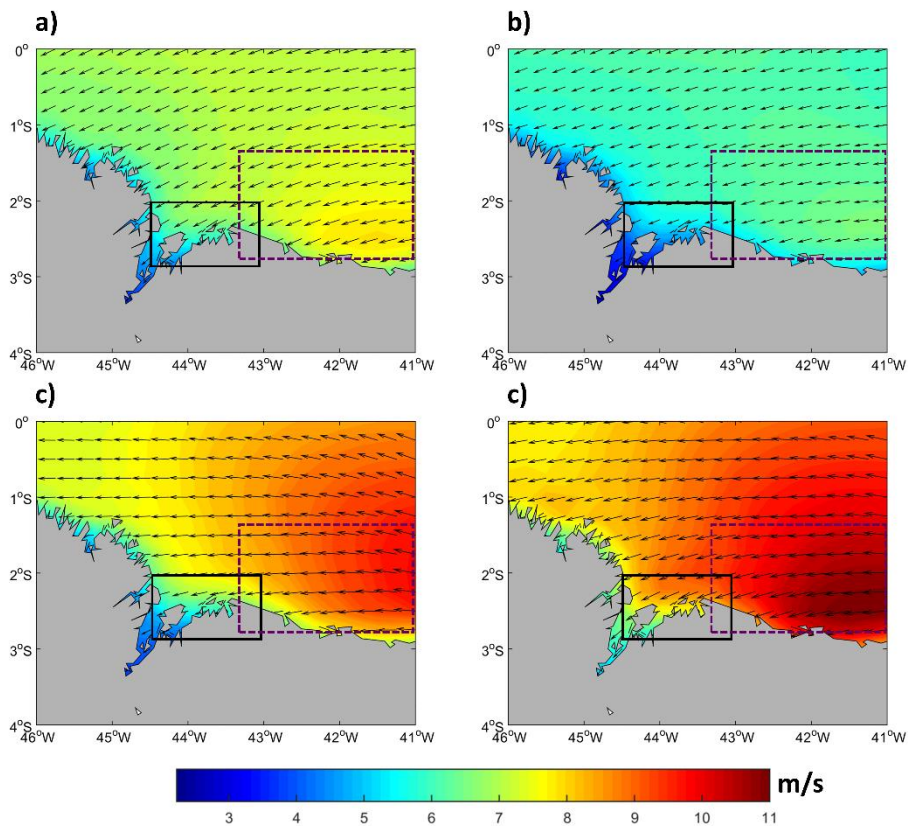
### *Climatologia Sazonal*

Os resultados apresentados na Figura 2 fornecem informações cruciais para a compreensão das condições eólicas na região de estudo. Notavelmente, a análise revela uma variação sazonal marcante nas velocidades do vento, o que tem implicações significativas para o desenvolvimento da energia eólica nessa área.

Durante os meses de junho a novembro, observa-se um padrão favorável, com as maiores velocidades do vento atingindo picos de até 11 m/s. Esse intervalo de meses representa um período propício para a geração de energia eólica offshore. A região próxima aos Lençóis Maranhenses (delimitada pelo retângulo tracejado), com velocidades do vento variando entre 9 m/s e 11 m/s, é particularmente promissora para o estabelecimento de parques eólicos devido à consistência das condições eólicas e às profundidades aquáticas variando de 20 a 200 metros. Da mesma forma, a região próxima ao Porto do Itaqui (destacado pelo retângulo preto), com velocidades do vento variando de 2 m/s a 9 m/s, oferece oportunidades para a geração de energia eólica offshore, especialmente nos meses de setembro a novembro, quando os ventos são mais intensos.

No entanto, a análise também revela um desafio significativo para a geração de energia eólica na região durante os meses de dezembro a maio. Nesse período, as velocidades do vento diminuem, atingindo os menores valores, e isso se deve à influência da Zona de Convergência Intertropical e dos Distúrbios Ondulatórios de Leste. Esses fenômenos atmosféricos causam convergência em baixos níveis da atmosfera, o que cria um cenário desafiador para a produção de energia

eólica. Isso destaca a necessidade de considerar estratégias de compensação ou armazenamento de energia durante esses meses, a fim de manter um suprimento estável de energia eólica. Em consonância com observações anteriores feitas por Cavalcanti et al. (2020), esses resultados confirmam a importância de uma abordagem cuidadosa e adaptativa no planejamento da energia eólica na região, levando em consideração as flutuações sazonais nas condições eólicas.



**Figura 2** – Climatologia sazonal da velocidade do vento (m/s) e direção a uma altura de 100m para reanálise atmosférica ERA5 para o período de 1979–2020. Sendo: **a)** dezembro-janeiro-fevereiro; **b)** março-abril-maio, **c)** junho-julho-agosto, **d)** setembro-outubro-novembro.

### *Densidade Eólica*

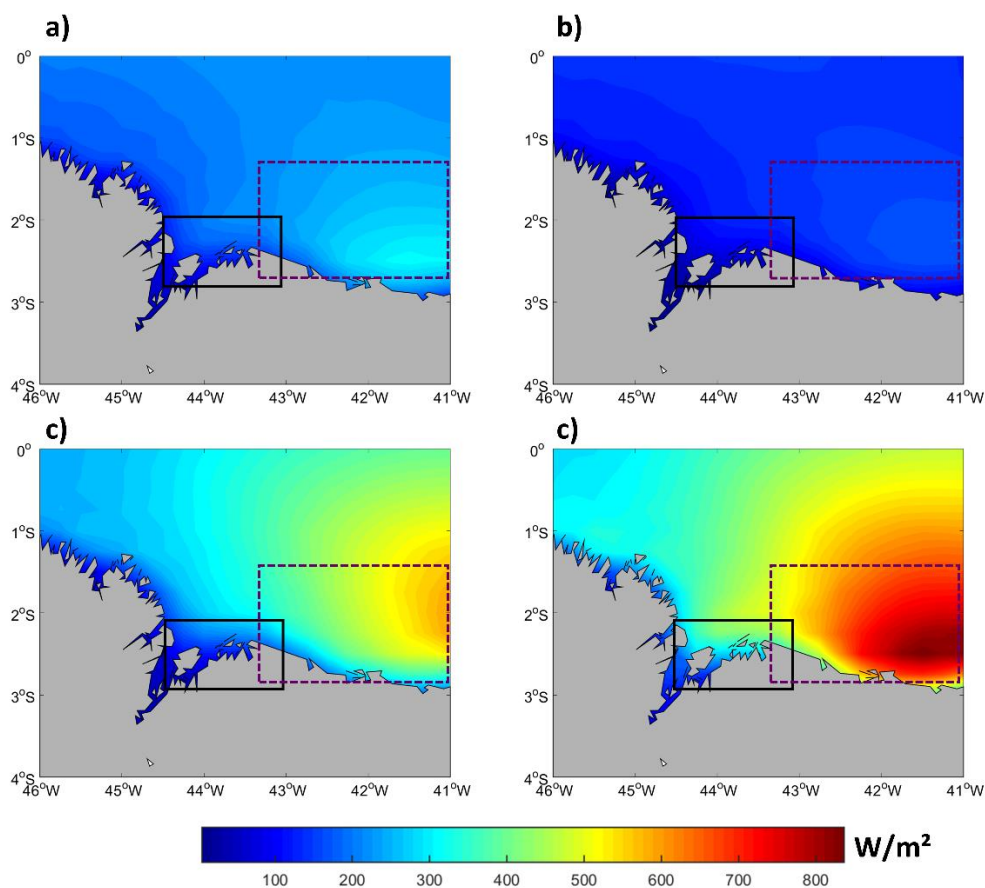
A relação entre a potência eólica e a velocidade do vento, conforme expressa na Equação (1), é fundamental para entender como a energia eólica é gerada em uma determinada região. Espera-se que a distribuição da densidade de energia eólica siga o mesmo padrão da velocidade do vento, uma vez que a potência eólica está diretamente relacionada ao cubo da velocidade do vento. A Figura 3 apresenta a densidade de energia eólica para a região de estudo, o que nos permite visualizar essa relação.

É notável que os maiores valores de densidade de energia eólica estejam concentrados durante o período seco da região, quando os ventos estão mais intensos, como evidenciado na Figura 2c-d. Durante os meses de junho a novembro, destacam-se os valores máximos de densidade de energia eólica

(PWD), atingindo aproximadamente  $600 \text{ W/m}^2$  a  $800 \text{ W/m}^2$ , com um pico notável nos meses de setembro a novembro. Esses dados corroboram a observação anterior de que esse período é altamente propício para a geração de energia eólica na área.

Ao analisar a região próxima ao Porto do Itaqui (delimitada pelo retângulo contínuo), observamos valores máximos de PWD em torno de  $500 \text{ W/m}^2$ , indicando um potencial favorável para a produção de energia eólica, embora ligeiramente inferior em comparação com a área próxima aos Lençóis Maranhenses (delimitada pelo retângulo tracejado), onde os valores de PWD atingem cerca de  $850 \text{ W/m}^2$ . Isso destaca a importância de identificar áreas de maior densidade de energia eólica para otimizar a localização de parques eólicos.

Esses resultados são essenciais para orientar o planejamento estratégico da geração de energia eólica na região estudada. A compreensão da distribuição sazonal da densidade de energia eólica permite que os investidores e planejadores de energia tomem decisões informadas sobre a alocação de recursos e a maximização do potencial de geração de energia eólica. Além disso, esses dados fornecem um valioso insight para a sustentabilidade energética da região, contribuindo para a transição para fontes de energia mais limpas e renováveis.



**Figura 3** – WPD ( $\text{W/m}^2$ ) sazonal a uma altura de 100m, obtidos a partir da reanálise atmosférica do ERA5, abrangendo o período de 1979 a 2020. Sendo: **a)** dezembro-janeiro-fevereiro; **b)** março-abril-maio, **c)** junho-julho-agosto, **d)** setembro-outubro-novembro.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Em conclusão, os resultados apresentados neste estudo fornecem uma visão valiosa das condições eólicas na região de estudo e têm implicações significativas para o planejamento e a implementação de projetos de energia eólica. A relação entre a potência eólica e a velocidade do vento, conforme evidenciada pela Equação (1), é fundamental para entender a capacidade de geração de energia eólica em uma determinada área.

Observamos que os maiores valores de densidade de energia eólica estão concentrados no período seco da região, quando os ventos são mais intensos, particularmente nos meses de junho a novembro, com um pico notável de setembro a novembro. Esses meses são altamente favoráveis para a geração de energia eólica, apresentando densidades de energia que atingem até 800 W/m<sup>2</sup>. Além disso, identificamos variações regionais, com a área próxima aos Lençóis Maranhenses apresentando uma densidade de energia eólica excepcionalmente alta de cerca de 850 W/m<sup>2</sup>, em comparação com a região próxima ao Porto do Itaqui, onde os valores se situam em torno de 500 W/m<sup>2</sup>.

Esses achados são cruciais para orientar estratégias de planejamento energético, permitindo a alocação eficiente de recursos e o aproveitamento máximo do potencial de geração de energia eólica na região. Além disso, essa análise contribui para a transição para fontes de energia mais sustentáveis e renováveis, desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento sustentável e na redução das emissões de carbono. Em última análise, os resultados destacam a importância de considerar não apenas a velocidade média do vento, mas também a variação sazonal e regional das condições eólicas ao planejar e implementar projetos de energia eólica. Essa abordagem informada é essencial para alcançar uma geração de energia eficiente, confiável e ambientalmente responsável, contribuindo para um futuro mais limpo e sustentável.

Além disso, recomendamos que estudos futuros voltados para a instalação de parques eólicos *offshore* incorporem alguns critérios essenciais. Primeiramente, é aconselhável considerar uma distância mínima de 18 km da costa, conforme sugerido por Ladenburg e Dubgaard (2007). Essa medida visa a minimizar o impacto visual das turbinas eólicas, sendo uma abordagem realista para projetos dessa natureza. Outro critério relevante a ser levado em conta é a exclusão de áreas com velocidades médias do vento inferiores a 7 m/s, como indicado por Musial et al. (2016). Nessas regiões, a tecnologia eólica *offshore* pode não ser viável, tornando essencial identificar áreas com ventos adequados para a geração de energia eólica. Por último, mas não menos importante, é de suma importância excluir as áreas dedicadas à preservação ambiental, as quais não devem ser consideradas como locais adequados para a instalação de parques eólicos. O litoral brasileiro abriga diversas áreas de preservação natural, as quais podem ser classificadas em unidades de conservação de proteção integral (onde

apenas o uso indireto dos recursos naturais é permitido) e unidades de conservação de uso sustentável (que possibilitam a coexistência da conservação ambiental com a utilização responsável dos recursos) (TAVARES et al., 2020). A incorporação desses critérios em estudos futuros contribuirá para um planejamento mais eficaz e responsável na instalação de parques eólicos offshore ao longo do litoral Maranhense, levando em consideração não apenas a viabilidade técnica, mas também a preservação ambiental e a minimização de impactos visuais indesejados.

## REFERENCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS – ANTAQ. *IMPACTOS E RISCOS DA MUDANÇA DO CLIMA NOS PORTOS PÚBLICOS COSTEIROS BRASILEIROS*. [s.l: s.n.]

ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA). Banco de Informações de Geração. Capacidade de Geração do Brasil. Brasília, 2020. Disponível em: < <https://tinyurl.com/yyr2hb3s>>. Acesso em: 12 set. 2023.

BECKER, A. et al. Implications of climate change for shipping: Ports and supply chains. *WIREs Climate Change*, v. 9, n. 2, p. e508, 2018. Disponível em: <<https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wcc.508>>.

CARVALHO, D. et al. Offshore wind energy resource simulation forced by different reanalyses: Comparison with observed data in the Iberian Peninsula. *Applied Energy*, v. 134, p. 57–64, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914008216>>.

CARVALHO, I. T. **ENERGIA EÓLICA OFFSHORE: POTENCIAL E DESAFIOS DE IMPLANTAÇÃO**. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) - Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande. Paraíba, p. 44. 2017

CUNHA, R. V. C. Evolução do contraste térmico terra-oceano em condições de mudança climática. 2019. Tese de mestrado, Ciências Geofísicas (Meteorologia e Oceanografia) Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, 2019.

EMAP, Porto do Itaqui faz convênio com Fundación Valenciaport. EMAP, 2023. Disponível em: <https://www.portodoitaqui.com/imprensa/noticia/porto-do-itaqui-faz-convenio-com-fundacion-valenciaport>. Acesso em: 12 set. 2023.

ESTEBAN, M. D. et al. Why offshore wind energy? *Renewable Energy*, v. 36, n. 2, p. 444–450, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110003332>>.

FALKNER, R. The Paris Agreement and the new logic of international climate politics. *International Affairs*, v. 92, n. 5, p. 1107–1125, 1 set. 2016.

Firjan, Porto do Açu e Pacto Global da ONU lançam Grupo de Trabalho de Negócios Oceânicos. Firjan, 2020. Disponível em:

GOMES, S. de S. M. et al. Proposal of a methodology to use offshore wind energy on the southeast coast of Brazil. *Energy*, v. 185, p. 327–336, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219313842>>.

GONZÁLEZ, M. O. A.; GONÇALVES, J. S.; VASCONCELOS, R. M. Sustainable development: Case study in the implementation of renewable energy in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 142, p. 461–475, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616316614>>.

Graham, R. M., Hudson, S. R., & Maturilli, M. (2019). Improved Performance of ERA5 in Arctic Gateway Relative to Four Global Atmospheric Reanalyses. *Geophysical Research Letters*, 46(11), 6138–6147. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2019GL082781>

HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., BIAVATI, G., HORÁNYI, A., MUÑOZ SABATER, J., NICOLAS, J., PEUBEY, C., RADU, R., ROZUM, I., SCHEPERS, D., SIMMONS, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2018): ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).

HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., HIRAHARA, S., HORÁNYI, A., MUÑOZ SABATER, J., NI447 COLAS, J., PEUBEY, C., RADU, R., SCHEPERS, D. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 146, p. 1999 – 449, 2020. <https://www.firjan.com.br/noticias/firjan-porto-do-acu-e-pacto-global-da-onu-lancam-qt-de-negocios-oceanicos.htm>. Acesso em: 12 set. 2023.

IRENA (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY). Offshore innovation widens renewable energy options: Opportunities, challenges and the vital role of international co-operation to spur the global energy transformation. 2018.

IRENA (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY). Wind Energy. Disponível em: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>. Acesso em: 12 set. 2023.

LIMA, D. K. S. et al. Estimating the offshore wind resources of the State of Ceará in Brazil. *Renewable Energy*, v. 83, p. 203–221, 2015a. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115003055>>.

LIMA, D. K. S. et al. Estimating the offshore wind resources of the State of Ceará in Brazil. *Renewable Energy*, v. 83, p. 203–221, 2015b. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115003055>>.

MATTAR, C.; BORVARÁN, D. Offshore wind power simulation by using WRF in the central coast of Chile. *Renewable Energy*, v. 94, p. 22–31, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116301896>>.

MELLO, N.G.S, FERREIRA, A. G. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico

no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, vol.1, nº 1. 15-28p, 2005.

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). Acordo de Paris. Brasília, 2017. Disponível em: <https://tinyurl.com/ydd7gwf7>. Acesso em: 12 set. 2023.

NAGABABU, G. et al. Application of reanalysis data to estimate offshore wind potential in EEZ of India based on marine ecosystem considerations. *Energy*, v. 118, p. 622–631, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216315420>>.

NAGABABU, G. et al. Evaluation of Wind Resource in Selected Locations in Gujarat. *Energy Procedia*, v. 79, p. 212–219, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215021992>>.

NOTTEBOOM, T.; PALLIS, T.; RODRIGUE, J.-P. Disruptions and resilience in global container shipping and ports: the COVID-19 pandemic versus the 2008–2009 financial crisis. *Maritime Economics & Logistics*, v. 23, n. 2, p. 179–210, 2021.

NUNES, João Paulo Costa et al. **Energia eólica offshore: um estudo de caso para análise da viabilidade técnico-econômica de uma usina próxima à costa do Rio Grande do Norte**. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

ORTIZ, G. P.; KAMPEL, M. Potencial de energia eólica offshore na margem do Brasil. **V Simpósio Brasileiro de Oceanografia. Santo/SP: Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo**, 2011.

Pakulski, L., Porto do Itaqui projeta mais de 13 milhões de T de grãos em 2021. EMAP, 2021. Disponível em: <https://www.portodoitaqui.com/imprensa/noticia/porto-do-itaqui-projeta-mais-de-13-milhoes-de-t-de-graos-em-2021>. Acesso em: 12 set. 2023.

REIS, L. B., Energia Elétrica para o Desenvolvimento Sustentável. São Paulo, EDUSP, 2001.

SCHNEIDER, T., BISCHOFF, T. and HAUG, G. Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. *Nature*, v. 513, p. 45–53, 2014.

SHI, W. et al. Feasibility study of offshore wind turbine substructures for southwest offshore wind farm project in Korea. *Renewable Energy*, v. 74, p. 406–413, 2015.

SILVA, Amanda. Potencial eólico offshore no Brasil: localização de áreas nobres através de análise multicritério. 2019. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa Planejamento Energético, 2019.

TETZNER D., THOMAS E., ALLEN C. A Validation of ERA5 Reanalysis Data in the Southern Antarctic Peninsula—Ellsworth Land Region, and Its Implications for Ice Core Studies. *Geosciences*. v. 9, p. 289, 2019.

THÉPAUT, J.-N., DEE, D.P., ENGELEN, R. AND PINTY, B. (2018). The Copernicus programme and its climate change service. pp. 1591–1593 in IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain.

TROLLIET, M., WALAWENDER, J.P., BOURLÈS, B., BOILLEY, A., TRENTMANN, J., BLANC, P., LEFÈVRE, M. and WALD, L. Downwelling surface solar irradiance in the tropical Atlantic Ocean: a comparison of re-analyses and satellite-derived data sets to PIRATA measurements. *Ocean Science*, v. 14, p. 1021–1056, 2018.

URRACA, R., HULD, T., GRACIA-AMILLO, A., MARTINEZ-DE PISON, F.J., KASPAR, F. and SANZ-GARCIA, A. Evaluation of global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground and satellite based data. *Solar Energy*, v. 164, p. 339 – 354, 2018.

WALISER, D. E. & GAUTIER, C. A satellite-derived climatology of the ITCZ. *J. Climate*, v. 6, p. 2162–2174, 1993.

WANG, L. et al. Green efficiency evaluation and improvement of Chinese ports: A cross-efficiency model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 88, p. 102590, 2020.