

ESCOLA DE GUERRA NAVAL

CC VINÍCIUS SANTOS PESSANHA

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CONTEXTO DO PODER MARÍTIMO:
O Impacto das Condições de Onda na Avaliação de Rotas Marítimas e
Operacionalidade de Navios para Instalação de Parques Eólicos *Offshore* na
Costa Sul do Brasil**

Rio de Janeiro

2024

CC VINÍCIUS SANTOS PESSANHA

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CONTEXTO DO PODER MARÍTIMO:
O Impacto das Condições de Onda na Avaliação de Rotas Marítimas e
Operacionalidade de Navios para Instalação de Parques Eólicos *Offshore* na
Costa Sul do Brasil**

Monografia apresentada à Escola de
Guerra Naval, como requisito parcial
para a conclusão do Curso Superior.

Orientador: CC (RM3-EN) Victor
Cabral da Hora Aragão de Carvalho

Rio de Janeiro
Escola de Guerra Naval
2024

DECLARAÇÃO DA NÃO EXISTÊNCIA DE APROPRIAÇÃO INTELECTUAL IRREGULAR

Declaro que este trabalho acadêmico: a) corresponde ao resultado de investigação por mim desenvolvida, enquanto discente da Escola de Guerra Naval (EGN); b) é um trabalho original, ou seja, que não foi por mim anteriormente utilizado para fins acadêmicos ou quaisquer outros; c) é inédito, isto é, não foi ainda objeto de publicação; e d) é de minha integral e exclusiva autoria.

Declaro também que tenho ciência de que a utilização de ideias ou palavras de autoria de outrem, sem a devida identificação da fonte, e o uso de recursos de inteligência artificial no processo de escrita constituem grave falta ética, moral, legal e disciplinar. Ademais, assumo o compromisso de que este trabalho possa, a qualquer tempo, ser analisado para verificação de sua originalidade e ineditismo, por meio de ferramentas de detecção de similaridades ou por profissionais qualificados.

Os direitos morais e patrimoniais deste trabalho acadêmico, nos termos da Lei 9.610/1998, pertencem ao seu Autor, sendo vedado o uso comercial sem prévia autorização. É permitida a transcrição parcial de textos do trabalho, ou mencioná-los, para comentários e citações, desde que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos e ideias expressas neste trabalho acadêmico são de responsabilidade do Autor e não retratam qualquer orientação institucional da EGN ou da Marinha do Brasil.

Assinatura digital gov.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, CC (RM3-EN) Aragão, pela atenção e pelas orientações que foram determinantes para conclusão deste trabalho. Aos instrutores, demais membros da equipe da EGN e colegas de turma, agradeço pelo excelente ambiente de aprendizagem ao longo do C-Sup 2024. Minha sincera gratidão à minha família, cujo suporte incondicional foi essencial durante a jornada.

RESUMO

A crescente procura por licenciamento ambiental para a instalação de parques eólicos *offshore* no Brasil, especialmente no litoral sul, reflete o interesse crescente na expansão da matriz energética sustentável do país. No entanto, as condições típicas de ondas na costa sul podem afetar a operação de navios de carga pesada envolvidos na instalação dessas infraestruturas, sobretudo com o crescimento registrado de eventos extremos na região. Neste estudo analisam-se as condições de onda ao longo da rota marítima mais utilizada na costa sul do Brasil e em uma futura área de instalação de complexo eólico *offshore*, utilizando o fluxo de energia das ondas (P_w) como parâmetro para avaliar a segurança da navegação e a eficiência das operações marítimas. Os resultados mostram que, embora o P_w geralmente permaneça dentro dos limites operacionais, períodos críticos, especialmente no outono e inverno, apresentam riscos aumentados de exceder esses limites. O mês de maio é identificado como o de maior risco, enquanto os meses de verão são os mais seguros para operações marítimas. No estudo também desenvolveu-se uma inovadora ferramenta de auxílio à decisão com mapas de P_w baseados em previsões de modelos numéricos de onda. As conclusões destacam a importância da análise do limite operacional em relação às condições de onda e a versatilidade da ferramenta desenvolvida com seu potencial de impacto, tanto no planejamento e execução de operações *offshore* quanto em operações navais.

Palavras-chave: Fluxo de energia das ondas. Parques eólicos *offshore*. Rotas marítimas. Limites operacionais.

ABSTRACT

The growing demand for environmental licenses to install offshore wind farms in Brazil, particularly along the south coast, underlines the country's increasing interest in expanding its sustainable energy sources. However, the typical wave conditions along the south coast may affect the operation of heavy-lift vessels installing these infrastructures, especially with the recorded increase in extreme events in the region. This study examines the ocean wave conditions along the primary maritime route and the planned installation area of an offshore wind farm complex on the south coast of Brazil, using wave energy flux (P_w) as a parameter for assessing navigation safety and maritime operation efficiency. The results suggest that while P_w generally stays within operational limits, specific periods, particularly autumn and winter, pose an elevated risk of exceeding these limits. May is identified as the highest-risk month, while the summer months are the safest for maritime operations. The study also introduces an innovative decision support tool that includes P_w maps based on wave numerical model forecasts. The conclusions underline the importance of analyzing operational limits concerning wave conditions and the versatility of the developed tool, emphasizing its potential impact on the planning and execution of offshore and naval operations.

Keywords: Wave energy flux. Offshore wind farms. Maritime routes. Operational limits.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Área de Estudo.....	21
FIGURA 2 - Fluxo Médio de Energia de Ondas na Costa Sul do Brasil.....	26
FIGURA 3 - Frequência Mensal do Fluxo de Energia de Ondas Excedendo o Limite Operacional.....	27
FIGURA 4 - Distribuição do Percentual de Excedência pelos Pontos Selecionados.....	28
FIGURA 5 - Ferramenta de Auxílio à Decisão: Mapas de Previsão de Fluxo de Energia de Ondas.....	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIS	<i>Automatic Identification System</i>
CHM	Centro de Hidrografia da Marinha
COMPAAz	Comando de Operações Marítimas e Proteção da Amazônia Azul
Ibama	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IMO	<i>International Maritime Organization</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MB	Marinha do Brasil
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
PEM	Plano Estratégico da Marinha
PND	Política Nacional de Defesa
WW3	<i>WAVEWATCH-III</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ} S$	-	grau (s) de latitude sul
$^{\circ} O$	-	grau (s) de longitude oeste
<i>Bias</i>	-	viés
H_{max}	-	altura máxima da onda
H_s	-	altura significativa de onda
J	-	joule (s)
m	-	metro (s)
MN	-	milha (s) náutica (s)
P_w	-	fluxo de energia de ondas
<i>RMSE</i>	-	erro quadrático médio
s	-	segundo (s)
<i>SS</i>	-	<i>skill score</i>
T_p	-	período de pico da onda
kW	-	quilowatt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1	ONDAS OCEÂNICAS E ENERGIA DE FLUXO DE ONDAS.....	14
2.2	CLIMATOLOGIA DE ONDAS.....	16
2.3	DADOS DE REANÁLISE DE ONDAS.....	17
2.4	PREVISÃO DE ONDAS.....	17
2.5	LIMITE OPERACIONAL DE NAVIOS DE CARGA PESADA.....	18
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	20
3.2	DESCRIÇÃO E AVALIAÇÃO DOS DADOS HISTÓRICOS DE ONDA.....	22
3.3	LIMITES OPERACIONAIS ADOTADOS.....	23
3.4	DELINEAMENTO DO ESTUDO E PROCEDIMENTOS.....	23
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
4.1	VALIDAÇÃO DOS DADOS.....	25
4.2	FLUXO MÉDIO DE ENERGIA DE ONDAS NA COSTA SUL.....	25
4.3	FLUXO DE ENERGIA DE ONDAS NA ROTA MARÍTIMA E ÁREA RS-19 “QUERÊNCIA”.....	27
4.4	IMPLICAÇÕES PARA O TRANSPORTE E O IMPACTO DA DEFINIÇÃO DOS LIMITES OPERACIONAIS.....	30
4.5	FERRAMENTA DE AUXÍLIO À DECISÃO.....	31
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	34
	REFERÊNCIAS.....	38
	ANEXO.....	41

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas representam uma ameaça significativa, intensificando eventos meteorológicos extremos e alterando o nível médio do mar, o que afeta a navegação e atividades econômicas marítimas (Germond; Mazaris, 2019). É imperativo adotar ações para mitigar esses efeitos, aumentando a resiliência e a sustentabilidade dos ecossistemas marinhos, assim como a eficiência do transporte marítimo. Neste contexto, destaca-se a transição para fontes de energia renováveis, como a energia eólica, que é uma resposta vital ao aquecimento global, devido à sua capacidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir para a segurança energética e a sustentabilidade econômica.

Os parques eólicos *onshore* são uma tecnologia consolidada. Por outro lado, os parques eólicos *offshore*, mesmo sendo mais produtivos devido aos ventos mais intensos em ambientes marinhos e possuindo um potencial no Brasil que supera em até 12 vezes o da área continental (Ortiz; Kampel, 2011), ainda precisam ser explorados. Porém, existe um crescente interesse na instalação de novos complexos eólicos *offshore* no Brasil, sobretudo nos estados do Rio Grande do Sul e Ceará (IBAMA, 2024a), trazendo uma nova perspectiva para o desenvolvimento da matriz energética nacional.

Entretanto, um dos principais obstáculos na implementação de parques eólicos *offshore* é o transporte dos componentes do sistema, como aerogeradores, pás e torres, até os locais de instalação. O transporte marítimo, apesar de oferecer menos restrições para o deslocamento de componentes maiores e mais pesados, ainda enfrenta desafios significativos relacionados às condições meteorológicas adversas, que podem limitar a operacionalidade dos navios. Portanto, é essencial realizar estudos detalhados sobre as rotas marítimas, a fim de mapear as adversidades e fatores limitantes.

A relevância deste estudo é sustentada por diretrizes estratégicas nacionais e da Marinha do Brasil (MB). Segundo a Política Nacional de Defesa (PND) 2020, o desenvolvimento do Brasil deve ser suportado pela expansão da matriz energética, incluindo o aproveitamento do potencial eólico do país (Brasil, 2020b). Alinhado com esse conceito, o Plano Estratégico da Marinha (PEM) 2040 destaca o desenvolvimento sustentável como um fator crucial que impacta significativamente o Poder Marítimo, considerando-o um dos elementos mais importantes para a

consolidação desse poder. Além disso, o PEM evidencia a importância de uma gestão eficaz do espaço costeiro, propondo a coordenação e a promoção de atividades sustentáveis no oceano, incluindo a produção de energia eólica (Brasil, 2020a).

Pesquisas anteriores, como os trabalhos de Acero *et al.* (2016), que apresentam uma metodologia para a avaliação dos limites operacionais voltados à instalação de turbinas eólicas *offshore*, e Rathje (2015), que discute os impactos das condições do tempo em transportes marítimos realizados por navios de grande porte, oferecem importantes bases teóricas. Contudo, há uma lacuna na literatura quanto à aplicação específica de metodologias para otimizar o transporte de componentes para parques eólicos *offshore* no Brasil, considerando as peculiaridades climáticas e operacionais na costa sul do país.

Neste estudo tem-se como objetivos analisar as condições de onda na área de interesse, considerando o limite operacional de navios de carga pesada, e elaborar um novo produto de auxílio à decisão que contribua na avaliação de rotas marítimas para o transporte de aerogeradores e os componentes necessários à instalação de parques eólicos *offshore* na costa sul do Brasil. Dessa forma, espera-se contribuir para a segurança da navegação e para o planejamento eficiente de futuras instalações de parques eólicos *offshore*, promovendo a integração de práticas sustentáveis no desenvolvimento do Poder Marítimo e na expansão da matriz energética limpa do Brasil.

Para alcançar esses objetivos, primeiramente, a rota marítima foi definida com base em dados de tráfego de navios na costa sul do Brasil (INDE, 2024) e, considerando processos de licenciamento ambiental (Ibama, 2024a), foi selecionada uma área com previsão de instalação de um complexo eólico *offshore* (Ibama, 2024b) para a análise. Em seguida, foram utilizados dados históricos de ondas (Law-Chune *et al.*, 2021) para caracterizar a área de interesse e identificar padrões relevantes. Adicionalmente, foram definidos os limites operacionais dos navios de carga pesada, levando em conta as características das ondas. Finalmente, foi elaborado um novo produto de auxílio à decisão para a avaliação de rotas marítimas seguras e eficientes, integrando variáveis operacionais e ambientais de onda.

As delimitações da pesquisa são delineadas pelo espaço, tempo e características operacionais específicas. Espacialmente, a investigação está restrita à costa dos estados da região sul do Brasil, uma das áreas prioritárias para a

instalação de parques eólicos *offshore*. Temporalmente, são analisados dados de onda de pouco mais de duas décadas (de 2001 a 2022) para caracterizar o regime predominante e identificar os padrões relevantes na área de interesse. As características operacionais são restritas aos navios de carga pesada (*heavy-lift ship*), considerando as limitações de navegação de acordo com as condições de onda.

O estudo proposto pretende responder às seguintes questões de pesquisa: a rota marítima mais utilizada na costa sul do Brasil é adequada para o transporte de aerogeradores e os componentes necessários à instalação de parques eólicos *offshore*, considerando os limites operacionais impostos pelas condições de onda? Qual é o melhor período do ano para transportar os materiais e componentes, bem como para realizar a instalação de parques eólicos *offshore*, na costa do Rio Grande do Sul?

Além desta seção introdutória, o trabalho está organizado da seguinte forma: a segunda seção, Referencial Teórico, aborda os conceitos fundamentais relacionados às ondas oceânicas, a energia de fluxo de ondas, a climatologia das ondas na costa sul do Brasil, os dados de reanálise de ondas oceânicas, os limites operacionais de navios de carga pesada e previsão de ondas. A terceira seção, Material e Métodos, detalha a área de estudo, descrevendo a determinação da rota marítima e a escolha da área de instalação do complexo eólico a ser estudada, os dados históricos de ondas utilizados no estudo e a metodologia aplicada para processar e analisar esses dados. A quarta seção, Resultados e Discussão, apresenta e discute os resultados da análise dos dados na área de interesse e suas implicações. Finalmente, a quinta seção, Considerações Finais, oferece uma síntese das conclusões e recomendações para futuras pesquisas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção são abordados os conceitos fundamentais relacionados às ondas oceânicas, a energia de fluxo de ondas, a climatologia das ondas na costa sul do Brasil, os dados de reanálise de ondas e os limites operacionais de navios de carga pesada. Inicialmente, são descritas as características das ondas oceânicas, o conceito de energia de fluxo de ondas e sua relevância para a segurança da navegação. Em seguida, é apresentada a climatologia das ondas na costa sul do

Brasil. Na subseção sobre dados de reanálise de ondas oceânicas, explora-se o uso do conjunto de dados *Waverys*, que fornece dados detalhados das condições de onda ao longo do tempo. Além disso, na seção aborda-se a determinação dos limites operacionais de navios de carga pesada para garantir a segurança e a eficiência das operações marítimas. Por fim, descreve-se a previsão de ondas na costa sul do Brasil.

2.1 Ondas oceânicas e energia de fluxo de ondas

Nos oceanos, ondas geradas pelos ventos podem se propagar por longas distâncias, transportar grandes quantidades de energia e, sob certas circunstâncias, causar grandes riscos à navegação e à operacionalidade de navios. Essas ondas se originam e têm suas características definidas pela interação entre o vento e a superfície dos oceanos, por meio da transferência de energia da atmosfera em movimento para a superfície da água. As ondas oceânicas têm como seus principais parâmetros a altura significativa de onda (H_s) e o período de pico da onda (T_p), conforme salientado por Espindola (2017).

De acordo com Holthuijsen (2017), H_s , para uma certa janela de tempo, pode ser determinada pela média do terço superior das alturas de onda, podendo ser calculada alternativamente a partir de uma análise espectral. Em termos de comparação com a altura máxima da onda (H_{max}) em um determinado intervalo de tempo, H_s é aproximadamente a metade do valor de H_{max} . Assim, por se tratar da média das ondas mais altas, H_s é considerada uma boa métrica e é comumente utilizada para representar a altura das ondas em uma região para um determinado momento. Porém, em uma tempestade, por exemplo, deve-se esperar que existam ondas com alturas superiores a H_s e que H_{max} seja cerca de duas vezes maior que H_s (embora a ocorrência de ondas com altura igual a H_{max} seja bem menor).

Em termos práticos, o período de onda representa o tempo que separa a passagem de duas cristas de ondas seguidas. No entanto, T_p se refere ao período da onda cuja frequência tenha a maior densidade espectral (Dias, Polette e Carmo, 2007), estando associado às ondas de maior energia e sendo, portanto, um parâmetro de grande relevância.

O fluxo de energia de ondas (P_w) é a quantidade de energia que passa pela área de um retângulo teórico ortogonal à direção de propagação da onda, cuja largura é de 1 m e a altura é a profundidade local, a cada segundo (Innocentini, Caetano e Carvalho, 2014). Ou seja, essa grandeza expressa a quantidade de energia transferida pelas ondas em $J s^{-1}m^{-1}$ ou W/m , podendo ser utilizado como um parâmetro para caracterizar as ondas. Conforme descrito por Innocentini, Caetano e Carvalho (2014), P_w , para águas profundas pode ser calculado pela equação (1), sendo expresso em kW/m .

$$P_w = 0,5 H_s^2 T_p \quad (1)$$

A vantagem de usar P_w está na consideração conjunta de H_s e T_p , o que proporciona uma análise mais completa das características das ondas. Por exemplo, uma onda com $H_s = 3$ m e $T_p = 14$ s tem um P_w maior do que outra onda com $H_s = 4$ m e $T_p = 7$ s. Essa abordagem é confirmada por trabalhos anteriores que estabeleceram P_w como uma métrica relevante para previsão de ressacas junto à costa relacionadas a condições de onda com $H_s \geq 2.5$ m (Innocentini, Caetano e Carvalho, 2014; Araújo *et al.*, 2018; Tecchio, 2024).

Innocentini, Caetano e Carvalho (2014) apresentam uma metodologia para identificar eventos de ondas intensas geradas a partir de sistemas meteorológicos distantes, avaliando sua importância por meio do P_w . A metodologia envolve a definição de locais de monitoramento ao longo da costa brasileira, onde os espectros de ondas são particionados em sistemas de ondas. Cada sistema de onda é avaliado pelo seu P_w , fornecendo uma análise mais detalhada das condições de onda e seu impacto potencial na costa.

O estudo de Araújo *et al.* (2018) reforça a aplicação prática do P_w na previsão de eventos de ressaca, demonstrando a eficácia dessa métrica na identificação de ressaca na costa. Tecchio (2024) também contribui com evidências, validando a utilização do P_w como ferramenta para previsão de ressaca. Essas pesquisas sublinham a importância de uma análise detalhada dos parâmetros de onda, combinando H_s e T_p , para uma previsão precisa e confiável do estado do mar junto à costa.

Os trabalhos anteriores validam o uso de P_w como um parâmetro robusto e eficaz. Porém, esses estudos são voltados para a previsão de ressacas junto a

costa, evidenciando a existência de uma lacuna na aplicação dessa métrica para o benefício da avaliação de rotas marítimas.

2.2 Climatologia de ondas

A compreensão da climatologia de ondas é crucial para o planejamento e execução de atividades em mar aberto. Na costa sul do Brasil, os padrões meteorológicos associados a eventos extremos de onda são influenciados pela presença de sistemas de alta pressão atmosférica na superfície do continente e sistemas de baixa pressão sobre o Atlântico Sul. Essas e outras condições, que aumentam o gradiente horizontal de pressão, favorecem a ocorrência de ondas severas (Sondermann *et al.*, 2023). Segundo Campos *et al.* (2010), a formação de frentes frias durante o outono e inverno contribui significativamente para a deterioração das condições de onda na costa sul durante essas estações.

Pianca, Mazzini e Siege (2010) realizaram um levantamento climatológico de ondas ao longo da costa brasileira utilizando 11 anos de dados de reanálise do modelo WAVEWATCH-III (WW3) da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Eles constataram que, no litoral sul, as ondas são predominantemente de sul durante o outono e inverno, com alturas variando entre 2 e 3 m e períodos entre 10 e 12 s. Na primavera e verão, as condições predominantes apresentam ondas de nordeste, com alturas entre 1 e 2 m e períodos entre 6 e 8 s.

Além disso, o estudo conduzido por Gramcianinov *et al.* (2023) revela tendências importantes no regime de eventos extremos de ondas no sudoeste do Atlântico Sul, destacando um aumento em termos de H_s , incluindo a costa sul do Brasil. Além disso, foi observada uma ampliação da área afetada por esses eventos e um aumento na duração e intensidade. O estudo sugere que essas mudanças estão associadas a um aumento na atividade ciclônica nessa área. Essas tendências têm implicações significativas para a gestão das estruturas costeiras e operações marítimas, que precisam se adaptar a essas novas condições climáticas extremas.

2.3 Dados de reanálise de ondas oceânicas

Os dados do *Waverys*, conforme descrito por Law-Chune *et al.* (2021), consistem em um conjunto abrangente de dados que oferece uma reanálise global das ondas oceânicas. O *Waverys* combina modelos matemáticos com dados históricos para recriar condições passadas, permitindo uma análise detalhada e precisa do comportamento das ondas ao longo do tempo.

A ferramenta *Waverys* fornece dados em uma resolução espacial de $1/5^\circ$ (aproximadamente 20 km) e resolução temporal de 3 horas. Isso permite que os parâmetros das ondas, como H_s e T_p , sejam registrados de forma precisa e contínua, oferecendo um panorama detalhado do estado do mar. Além de H_s e T_p , o *Waverys* também fornece outros parâmetros que auxiliam a compreensão das características das ondas oceânicas.

Um aspecto importante do *Waverys* é a consideração das correntes oceânicas e a assimilação de dados de satélites. Essa integração de diferentes fontes de dados garante uma análise abrangente das condições das ondas, incorporando variáveis que influenciam significativamente o comportamento das ondas em diferentes regiões oceânicas. A capacidade de assimilar dados de satélites, como altímetros, permite ao *Waverys* oferecer uma reanálise robusta e confiável.

A precisão e abrangência dos dados fornecidos pelo *Waverys* são críticos para estudos de climatologia das ondas e para a realização de projetos costeiros e *offshore*. Ao fornecer uma reanálise detalhada das condições passadas das ondas, o *Waverys* permite uma melhor compreensão dos padrões de ondas e suas variabilidades, contribuindo para o planejamento seguro e eficiente de atividades marítimas e costeiras.

2.4 Previsão de ondas

Segundo a publicação Normas da Autoridade Marítima para Atividades de Meteorologia Marítima (NORMAM-701/DHN), o Serviço Meteorológico Marinho (SMM), cuja responsabilidade pela operação cabe a MB, por meio do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), é responsável pela produção de análises e previsões meteoceanográficas no país (NORMAM-701, 2023). Uma de suas principais

atribuições é emitir avisos de ressaca e de mau tempo, essenciais para a segurança da navegação na METAREA V, área de responsabilidade marítima do Brasil. As previsões, que incluem previsões de ondas, são disseminadas por meio de boletins e avisos de mau tempo, pelo *site* e aplicativos oficiais do SMM, fornecendo informações voltadas para a salvaguarda da vida humana no mar e para a proteção de bens materiais e ambientais.

O WW3 é um modelo de ondas de terceira geração amplamente utilizado para previsões de ondas, inclusive pelo CHM no âmbito do SMM. O WW3 é capaz de simular a evolução do espectro de ondas ao longo do tempo e do espaço, fornecendo previsões de parâmetros como H_s e T_p . No contexto das atividades do SMM, o modelo WW3 é utilizado para gerar previsões de ondas com uma resolução espacial de até 4 km e uma janela temporal de 5 dias, oferecendo prognósticos a cada hora. Essas previsões são fundamentais para apoiar operações no mar e outras atividades marítimas em águas brasileiras.

Segundo Campos *et al.* (2021), o WW3 foi implementado no Atlântico Sul com um esquema de múltiplas grades, permitindo o ajuste da resolução espacial e dos parâmetros do modelo de acordo com as características locais. Essa abordagem possibilitou uma melhora significativa na qualidade das previsões, especialmente em regiões de dinâmica complexa. As previsões realizadas com o WW3 mostraram alta correlação com dados observacionais, como medições de satélite, destacando a precisão do modelo na estimativa das condições de onda mesmo em eventos extremos.

A robustez dos resultados do WW3 é fundamental para as atividades do SMM, já que as previsões precisas de ondas ajudam a garantir a segurança da navegação, especialmente em um cenário de condições extremas.

2.5 Limite operacional de navios de carga pesada

A determinação dos limites operacionais de navios é um aspecto crítico para a segurança e eficiência das operações marítimas, especialmente em transportes de carga pesada em condições meteorológicas adversas. Esses limites são relacionados ao estado do mar e frequentemente expressos em termos de parâmetros de ondas, como H_s e T_p . Para garantir a segurança das operações, é essencial avaliar esses limites durante a fase de planejamento.

De acordo com Li et al. (2021), os limites operacionais são estabelecidos a partir de análises da interação dinâmica entre o navio e as ondas. Essa metodologia utiliza critérios que garantem a segurança operacional ao determinar o estado de mar permitido, desde que a resposta do navio esteja dentro da capacidade de projeto.

Acero et al. (2016) apresentam uma metodologia para a avaliação dos limites operacionais, com ênfase na instalação de turbinas eólicas *offshore*. A abordagem sistemática baseia-se em procedimentos operacionais e análises numéricas para identificar eventos críticos e parâmetros de resposta correspondentes. A metodologia propõe que os limites operacionais sejam estabelecidos em termos de estado de mar e das respostas das embarcações, considerando fatores como a duração das atividades e as janelas meteorológicas disponíveis para a execução segura das operações.

De acordo com Rathje (2015), o mercado de transporte de cargas pesadas apresenta uma tendência clara para cargas cada vez mais pesadas e maiores, como aerogeradores e seus componentes, que exigem um tratamento especial durante o transporte marítimo. Essas cargas são normalmente acondicionadas e amarradas em navios de carga pesada, seguindo normas específicas da *International Maritime Organization* (IMO), que consideram as acelerações verticais induzidas por ondas oceânicas, impondo limites à operacionalidade dos navios. As acelerações padrão são baseadas em condições severas de inverno, representando os valores máximos aplicáveis. No entanto, a maioria dos transportes marítimos ocorre em condições mais amenas. Por isso, as normas permitem o cálculo das acelerações de projeto para condições específicas de navegação, do estado do mar e características do navio. Assim, as acelerações induzidas por ondas são calculadas por modelos matemáticos e processadas estatisticamente, tornando possível determinar os valores limites de H_s e T_p para a operacionalidade segura dos navios. Para garantir que as acelerações durante o trânsito não excedam os limites permitidos, os navios de carga pesada são normalmente equipados com sensores de aceleração, monitorados continuamente durante a navegação.

É importante ressaltar que os limites operacionais para o transporte de aerogeradores e seus componentes podem ser diferentes dos limites utilizados na área de instalação durante a operação de montagem dos aerogeradores. Os critérios operacionais para o transporte marítimo geralmente permitem condições de

estado do mar mais severas do que as permitidas durante a instalação. Isso ocorre porque a operação de instalação é mais sensível à estabilidade e ao controle preciso dos equipamentos em condições de onda elevadas. Portanto, para a instalação de aerogeradores eólicos *offshore*, os valores de H_s e T_p considerados seguros são geralmente menores do que os utilizados durante o transporte (COREWIND, 2021).

Esses estudos fornecem uma base para a compreensão da determinação dos limites operacionais de navios de carga pesada. Li *et al.* (2021) e Acero *et al.* (2016) destacam a importância das análises de resposta dinâmica e dos procedimentos operacionais para estabelecer esses limites, enquanto Rathje (2015) enfatiza a aplicação prática dessas normas no transporte de cargas pesadas, como aerogeradores. A integração dessas abordagens permite a definição dos limites operacionais, garantindo que as operações marítimas sejam realizadas de maneira segura e eficiente, mesmo em condições adversas. Dessa forma, o uso combinado de modelos matemáticos, análises estatísticas e monitoramento contínuo se mostra essencial para manter a segurança da navegação e a integridade das cargas transportadas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

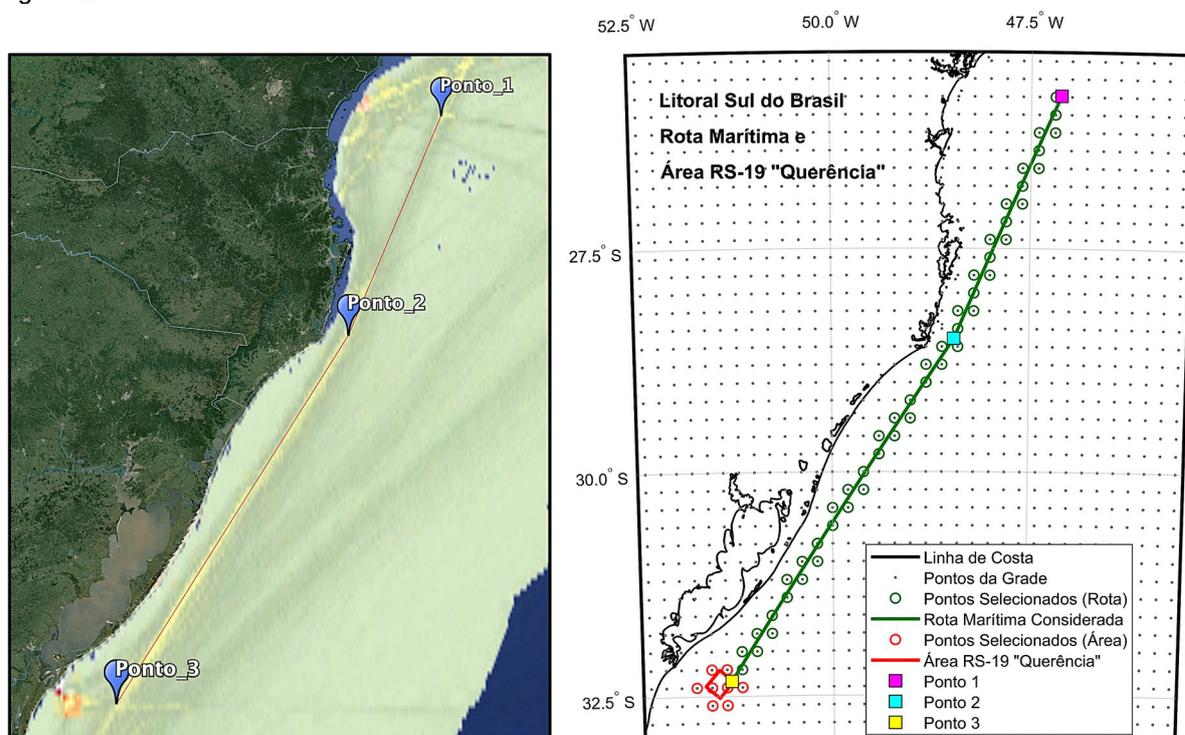
Nesta seção são detalhados a área de estudo e os dados históricos utilizados, assim como os limites operacionais adotados. Além disso, são descritas a rota marítima e a área de instalação de complexos eólicos *offshore* consideradas no estudo, bem como a metodologia aplicada para processar e analisar os dados de ondas.

3.1 Área de estudo

Atualmente, mais de 95 projetos aguardam licenciamento ambiental no Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) para a instalação de complexos eólicos *offshore* na costa brasileira (Ibama, 2024a). O estado do Rio Grande do Sul, com 27 projetos, apresenta o maior número de propostas, o que levou à escolha da costa sul do país como área de estudo. Sob a perspectiva da climatologia de ondas, a região sul se destaca por apresentar a maior frequência e intensidade de eventos de ondas altas (Pianca, Mazzini e Siegel, 2010).

Essas condições impõem limitações significativas à operacionalidade de navios e à segurança da navegação, reforçando os motivos para a seleção dessa área para a pesquisa.

Figura 1 - Área de estudo.



Fonte: O Autor.

Nota: No quadro à esquerda é apresentado o mapa de densidade de tráfego marítimo na costa sul do Brasil, a rota marítima considerada (linha vermelha) e os pontos (1, 2 e 3) da rota marítima. O quadro à direita ilustra os pontos da grade do Waverys (pontos em cinza) e pontos selecionados (círculos verdes e vermelhos) para análise ao longo da rota marítima (linha verde) e da área RS-19 "Querência" (linha vermelha).

A rota marítima considerada (Figura 1) foi determinada a partir de mapas de densidade de tráfego marítimo disponíveis no Portal Brasileiro de Dados Geoespaciais (INDE, 2024). Esses mapas, elaborados pelo Comando de Operações Marítimas e Proteção da Amazônia Azul (COMPAAz), utilizam dados do *Automatic Identification System* (AIS), um sistema de identificação automática que monitora navios e permite definir a intensidade do tráfego.

A Figura 1 mostra o litoral dos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, além do mapa de densidade de tráfego marítimo, com as áreas de maior tráfego indicadas pela maior intensidade das cores. Na figura, três pontos são destacados para demarcar a rota marítima com maior intensidade de tráfego: ponto 1 (25,79° S e 47,13° O), a 64 MN da costa de Paranaguá, PR; ponto 2 (28,51° S e 48,45° O), a 16 MN da costa de Laguna, SC; e ponto 3 (32,33° S e 51,34° O), a 39

MN da costa de Rio Grande, RS. A linha unindo esses pontos representa a rota marítima considerada no estudo, com uma extensão de aproximadamente 450 MN, possibilitando a análise dos limites operacionais dos navios durante a realização do transporte dos aerogeradores e seus componentes.

Além disso, considerando os mapas de projetos em licenciamento de complexos eólico *offshore* (Ibama, 2024b), foi selecionada área RS-19 “Querência” (Figura 1) para possibilitar a análise dos limites operacionais dos navios durante a instalação dos aerogeradores e seus componentes. Essa área tem forma retangular (vértices com latitude e longitude: 32,336° S e 51,322° O; 32,204° S e 51,497° O; 32,518° S e 51,500° O; e 32,385° S e 51,682° O), com área de aproximadamente 600 km² e está localizada a 30 MN da costa de Rio Grande, RS (Figura 1).

3.2 Descrição e avaliação dos dados históricos de onda

Neste trabalho, a fim de caracterizar o padrão climatológico da área de estudo, são utilizados os dados do *Waverys*, abrangendo o período de 1º de janeiro de 2001 a 31 de dezembro de 2022, cobrindo a área delimitada pelas longitudes entre 34° S e 54,8° O e latitudes entre 22° S e 35,8° O, totalizando 7.350 pontos de grade, espaçados aproximadamente 20 km entre si (Figura 1).

A avaliação da qualidade dos dados do *Waverys* é um passo crucial para garantir a confiabilidade da caracterização da área de estudo baseada nessa ferramenta. Essa validação pode ser realizada por comparação dos dados do *Waverys* com observações *in situ* de boias, que fornecem medições diretas de parâmetros de onda, permitindo uma verificação detalhada dos dados.

Para validar a reanálise, H_s e T_p dos resultados do *Waverys* foram comparados com as observações de uma boia localizada a 60 MN da costa de Itajaí (27,406° S e 47,2655° O), utilizando o ponto de grade do *Waverys* mais próximo à boia, situado em 27,4° S e 47,2° O, a uma distância de 6,6 km da boia (ver Anexo, Figura A1). Uma comparação gráfica foi realizada para avaliar qualitativamente o nível de concordância entre a saída do *Waverys* e as observações. Além disso, o desempenho foi quantificado em termos do parâmetro *skill score* (SS), erro quadrático médio (RMSE) e o viés (*Bias*), considerando X como a variável de interesse (H_s , por exemplo), X_{mod} como o dado do *Waverys*, X_{obs} como o dado da boia, N como o número de observações e $\langle X \rangle$ como a média horária.

O parâmetro SS de Wilmott (1981) revela a capacidade do modelo em estimar a variável observada, sendo $SS = 1$ indicando uma concordância perfeita e $SS = 0$ uma discordância completa, podendo ser calculado pela equação (2).

$$SS = 1 - \left(\sum |X_{mod} - X_{obs}|^2 \right) / \left[\sum (|X_{mod} - \langle X_{obs} \rangle| + |X_{obs} - \langle X_{obs} \rangle|)^2 \right] \quad (2)$$

O $Bias$ indica a tendência sistemática do modelo em superestimar ou subestimar as observações e é calculado pela equação (3).

$$Bias = \frac{1}{N} \sum (X_{mod} - X_{obs}) \quad (3)$$

O $RMSE$ mede a magnitude do erro entre o modelo e as observações, sendo uma métrica comum para avaliar a acurácia do modelo, onde valores menores indicam uma melhor performance, podendo ser calculado pela equação (4).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (X_{mod} - X_{obs})^2} \quad (4)$$

3.3 Limites operacionais adotados

Neste estudo são adotados, com base no estudo de Rathje (2015), os valores de $H_s = 4$ m e $T_p = 10$ s como limites operacionais para um navio de carga pesada tipo 183 (MV Lone) com 15.200 toneladas (tonelagem bruta), 160 m de largura, 27 m de boca e velocidade de serviço de 18 nós. A partir desses valores limites de H_s e T_p , obtém-se, por meio do uso da equação (1), um valor limite de $P_w = 80$ kW/m, sendo esse valor a referência a partir da qual a segurança do navio de carga pesada durante o transporte estará comprometida. Para a operação de instalação dos aerogeradores são assumidos, baseado no estudo de COREWIND (2021), os valores limites de $H_s = 3$ m e $T_p = 10$ s, tendo $P_w = 45$ kW/m como limite operacional.

3.4 Delineamento do estudo e procedimentos

O delineamento deste estudo foi estruturado para analisar as condições de onda ao longo da rota marítima considerada e na área RS-19 (descritas na seção 3.1), utilizando o conjunto de dados de reanálise do *Waverys*. O propósito é caracterizar a área de estudo considerando os limites operacionais para um navio de

carga pesada, com foco na segurança da navegação e eficiência do transporte de componentes eólicos *offshore*.

Neste trabalho, propõe-se que P_w seja utilizado como um indicador do estado do mar para fins de segurança da navegação no transporte de aerogeradores e seus componentes em rotas marítimas e na operação de instalação de aerogeradores. Assim, por meio de um código escrito na linguagem de programação *Matrix Laboratory* (MATLAB), os arquivos com dados de onda para cada um dos 7.350 pontos de grade do *Waverys* foram processados para criar séries temporais de 22 anos, com dados de H_s e T_p registrados a cada 3 horas para cada ponto. A partir dessas séries temporais, foi calculado o P_w para cada ponto. Esse processo resultou em oito mapas diários de P_w (um a cada 3 horas) cobrindo a área de estudo ao longo de mais de duas décadas de dados históricos.

Para analisar mais detalhadamente as condições de onda ao longo da rota marítima considerada, foram selecionados 51 pontos de grade usando um código MATLAB para identificar os pontos mais próximos da rota. Esses pontos estão localizados no entorno da rota e a uma distância não superior a 15 km, conforme ilustrado na Figura 1. A seleção dos pontos próximos à rota visa caracterizar com precisão as condições de onda ao longo do trajeto, evitando a necessidade de interpolação dos dados. De forma semelhante, foram selecionados 8 pontos de grade, sendo 2 pontos no interior da área RS-19 e 6 pontos no entorno da área (com distância não maiores do que 15 km do limite da área), para permitir uma caracterização detalhada dessa região específica (Figura 1).

A partir dos dados de P_w , foi possível caracterizar a costa sul do Brasil, a rota marítima e a área RS-19 em relação a esse parâmetro e à ocorrência de excedência do limite operacional ($P_w \geq 80$ kW/m para o transporte e $P_w \geq 45$ kW/m para a instalação de aerogeradores), momentos em que a segurança da navegação e as operações são comprometidas. Também foram determinados os períodos do ano e as regiões onde essas excedências ocorrem com maior frequência. Além disso, é apresentado um novo produto de auxílio à decisão, no qual são elaborados mapas de P_w utilizando a previsão de ondas do modelo WW3, destacando a linha do limite operacional para ressaltar as áreas onde a navegação é perigosa.

Este delineamento e os procedimentos adotados visam fornecer uma análise abrangente e precisa das condições de onda em relação ao limite operacional, contribuindo para a segurança da navegação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e analisados os dados históricos de ondas, destacando-se a validação dos dados do *Waverys*, onde os parâmetros de H_s e T_p são comparados com observações para garantir a precisão dos dados de reanálise utilizados. A avaliação da costa sul do Brasil é realizada por meio da caracterização e análise de P_w , utilizando os dados históricos da região. Além disso, é feita uma análise do fluxo de energia de ondas tanto ao longo da rota marítima quanto na área RS-19 "Querência", identificando padrões críticos para a navegação e instalação de estruturas *offshore*. Finalmente, é introduzida uma nova ferramenta de auxílio à decisão, baseada em mapas de P_w , que utiliza previsões de ondas do modelo WW3 para apoiar a tomada de decisões relacionadas à segurança das operações marítimas, permitindo uma visualização clara das condições operacionais.

4.1 Validação dos dados

Para validar o modelo, os dados de H_s e T_p providos pelo *Waverys* foram comparados com as observações obtidas pela boia de Itajaí. No período analisado, de 1º de março de 2017 a 30 de maio de 2019, os valores observados de H_s variam entre 0,64 e 6,14 m, enquanto os de T_p oscilam entre 3,2 e 18,9 s (ver Anexo, Figura A1).

A análise revela que os resultados do *Waverys* mostram uma elevada concordância com os parâmetros de onda observados. Em termos quantitativos, para H_s , o *Waverys* obteve um *SS* de 0,93, *RMSE* de 0,39 m e *Bias* de 0,23 m; para T_p , um *SS* de 0,82, *RMSE* de 1,9 s e *Bias* de 0,43 s.

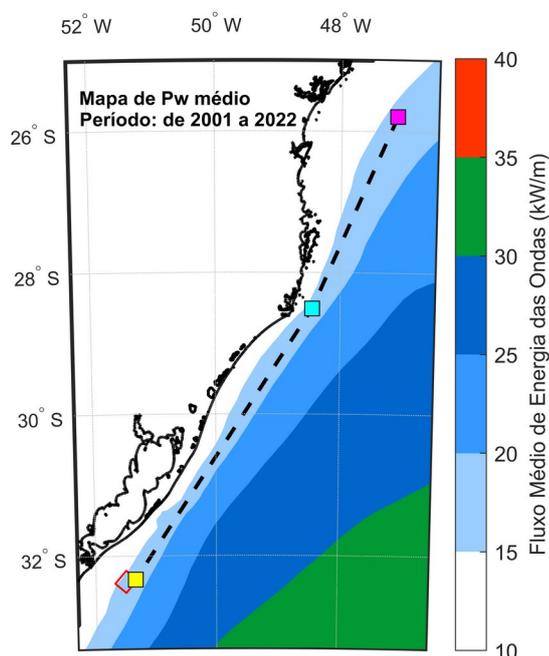
Esse resultado de validação está em consonância com o estudo de Tecchio (2024), que validou o *Waverys* ao longo da costa sul, comprovando a qualidade dos dados de reanálise e sua capacidade de representar com precisão os parâmetros de onda observados na região.

4.2 Fluxo médio de energia de ondas na costa sul

A Figura 2 apresenta a distribuição espacial do P_w médio ao longo da costa sul do Brasil, com base nos dados de 2001 a 2022. Nela destacam-se a rota

marítima (representada pela linha preta tracejada), o ponto 1 (quadrado magenta), o ponto 2 (quadrado azul), o ponto 3 (quadrado amarelo), a área RS-19 "Querência" (delimitada pela linha vermelha), além da linha de costa (indicada pela linha preta contínua). O mapa evidencia uma variação significativa de P_w na região, com valores menores junto à costa e um aumento progressivo em direção ao mar aberto. Próximo à costa, os valores médios de P_w permanecem abaixo de 15 kW/m, indicando uma menor energia das ondas nessas áreas mais abrigadas.

Figura 2 - Fluxo médio de energia de ondas na costa sul do Brasil.



Fonte: O Autor.

Conforme se avança em direção ao oceano e especialmente ao sul da área de estudo, os valores de P_w aumentam, atingindo os maiores valores na porção sudeste do mapa, onde superam 30 kW/m, destacando essa região como uma área de alta média de energia de ondas. Essa distribuição sugere que as condições de onda são mais energéticas em áreas mais afastadas da costa, o que pode ter implicações diretas para a navegação e a instalação de estruturas *offshore*, como parques eólicos.

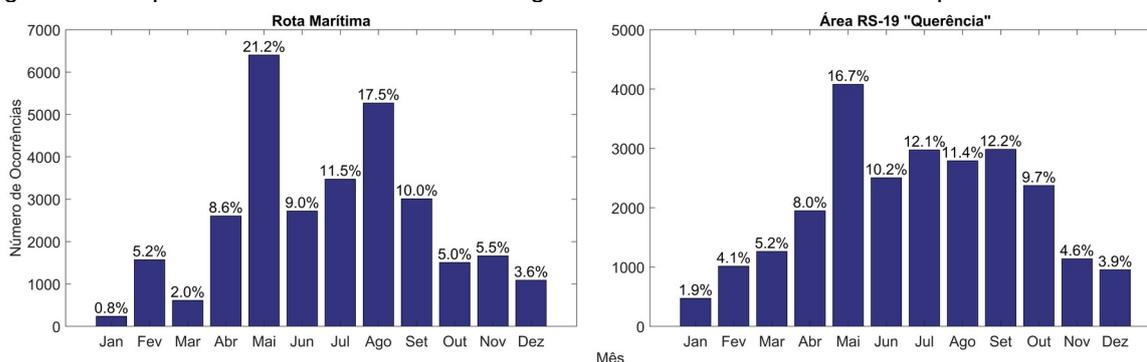
Com relação à rota marítima considerada e à área RS-19 "Querência", o P_w médio permanece inferior a 20 kW/m, o que, embora represente um nível relativamente moderado de energia de ondas, ainda pode oferecer desafios operacionais. Essa faixa de valores, mesmo que abaixo dos limites operacionais

típicos, pode ser superada durante eventos de mau tempo, quando as condições meteorológicas adversas elevam significativamente a energia das ondas. Nessas situações, o P_w pode ultrapassar os limites, colocando em risco a segurança da navegação e das operações. Dessa forma, é essencial considerar tais eventos extremos na fase de planejamento, a fim de mitigar possíveis riscos.

4.3 Fluxo de energia de ondas na rota marítima e área RS-19 "Querência"

A Figura 3 ilustra a distribuição das excedências mensais ao longo do ano, com base nos valores de P_w que ultrapassam os limites operacionais adotados: 80 kW/m para a rota marítima e 45 kW/m para a área RS-19 "Querência". As porcentagens apresentadas na figura foram calculadas em relação ao número total de ocorrências em que o P_w excedeu esses limites, utilizando os dados dos pontos selecionados, conforme mostrado na Figura 1, para o período entre 2001 e 2022.

Figura 3 - Frequência mensal do fluxo de energia de ondas excedendo o limite operacional.



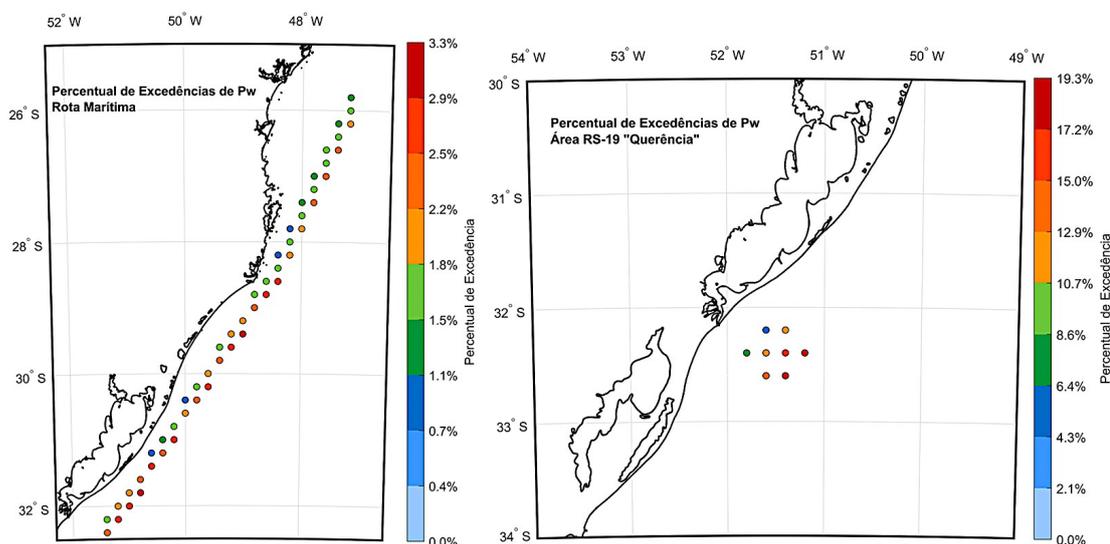
Fonte: O Autor.

Para a rota marítima, o mês de maio registrou o maior número de excedências, representando 21,2% do total de ocorrências, seguido por agosto com 17,5%. Esse comportamento reflete as condições de mar durante o outono e inverno, possivelmente influenciada pela atuação de sistemas meteorológicos mais intensos, como frentes frias e ciclones extratropicais, que elevam a energia das ondas nessa região. Em contraste, os meses de janeiro e março tiveram as menores porcentagens, com 0,8% e 2%, respectivamente, sugerindo condições mais amenas durante o verão.

Na área RS-19 "Querência", o padrão é semelhante, com maio novamente sendo o mês de maior número de excedências, representando 16,7% das ocorrências. Setembro e julho também se destacam com valores elevados,

correspondendo a 12,2% e 12,1%, respectivamente. Em contrapartida, os meses de janeiro, fevereiro e dezembro apresentaram os menores números de excedências, com 1,9%, 4,1% e 3,9%, refletindo o estado do mar mais calmo nessa época do ano.

Figura 4: Distribuição espacial do percentual de excedência pelos pontos selecionados.



Fonte: O Autor.

Para realizar uma análise detalhada da distribuição espacial das ocorrências de P_w que excedem o limite operacional, foi calculado o percentual de excedência para cada ponto ao longo da rota marítima e para cada ponto dentro da área RS-19. Esse método permitiu uma visualização mais clara dos padrões espaciais das excedências, evidenciando as regiões com maior ou menor número de ocorrências em que o P_w ultrapassou os limites operacionais.

Na Figura 4 (quadro à esquerda), os pontos da rota marítima são representados por círculos coloridos, com uma variação de cores que vai do azul e verde, indicando um menor percentual de excedência, até o laranja e vermelho, que representam os maiores percentuais. A análise da figura revela um padrão geográfico claro: os pontos localizados mais ao norte na rota marítima apresentam percentuais de excedência significativamente menores em comparação com aqueles situados nas regiões central e sul da rota. Esse comportamento pode estar relacionado a fatores meteorológicos e oceanográficos, como a influência de ventos mais intensos nas latitudes mais ao sul, que resultam em condições de onda mais severas e, portanto, em maiores valores de P_w . Além disso, a profundidade local afeta as ondas. Esse fator fica evidente ao observar que os pontos mais próximos à costa apresentam um percentual de excedência menor do que os pontos localizados

mais ao largo. Isso se deve à dissipação de energia das ondas ao se aproximarem da costa, onde a profundidade diminui e as ondas perdem parte de sua energia devido à interação com o fundo marinho. Por outro lado, à medida que nos afastamos da costa, em direção ao oceano aberto, as ondas não sofrem tanta influência do fundo marinho, resultando em um maior número de excedências.

Na área RS-19 "Querência", conforme mostrado na Figura 4 (quadro à direita), um padrão semelhante ao da rota marítima é observado. Os pontos mais próximos à costa registram os menores percentuais de excedência e oferecem condições mais estáveis para a navegação e instalação de aerogeradores. Ao mesmo tempo, os pontos localizados em áreas *offshore* apresentam percentuais mais elevados, sendo mais propensos a condições de onda mais severas.

A análise dos dados mostra a variação do P_w ao longo dos dias do ano (ver Anexo, Figura A2), considerando os 51 pontos distribuídos ao longo da rota marítima e os 8 pontos localizados na área RS-19. Na maior parte do tempo, o P_w permanece abaixo dos limites operacionais estabelecidos, que são excedidos em apenas 0,92% do tempo para os pontos da rota e em 4,78% do tempo para os pontos da área RS-19 ao longo dos 22 anos de dados analisados. Embora esses percentuais sejam relativamente baixos, observa-se que o P_w supera o limite operacional várias vezes a cada ano, com os valores mais elevados concentrados nos dias de outono e inverno, períodos marcados por condições meteorológicas mais adversas.

Para complementar essa análise, observa-se o comportamento do P_w ao longo do ano nos três pontos da rota marítima (ver Anexo, Figura A3), localizados em diferentes regiões da rota. O ponto 1, situado mais ao norte, apresenta o menor número de ocorrências acima do limite operacional, correspondendo a 0,52% do tempo, refletindo as condições mais calmas típicas dessa região. O ponto 2, localizado na região central, registra o maior número de excedências, correspondendo ao percentual de 1,31%, embora os valores máximos de P_w neste ponto não sejam os mais altos. O ponto 3, mais ao sul, destaca-se com o percentual de 1,16%, e apresenta os valores de P_w mais elevados, o que sugere uma maior intensidade de energia das ondas nessa área, especialmente durante as estações mais críticas.

4.4 Implicações para o transporte e o impacto da definição dos limites operacionais

Os resultados indicam que, tanto na rota marítima quanto na área RS-19 "Querência", o P_w permanece dentro dos limites operacionais na maior parte do tempo. No entanto, há períodos críticos, especialmente durante o outono e o inverno, quando o risco de excedência desses limites aumenta significativamente. Em ambas as regiões, o mês de maio se destaca como o período de maior risco, refletindo as condições mais adversas, com ondas mais energéticas e frequentes. Por outro lado, os meses de janeiro e março, na rota marítima, e janeiro, fevereiro e dezembro, na área RS-19, apresentam os menores riscos, indicando que esses períodos são mais adequados para operações que requerem condições mais estáveis.

A análise espacial também evidencia que as áreas mais ao sul e afastadas da costa são mais vulneráveis a condições de mar adversas. Essas regiões experimentam maior energia das ondas, o que aumenta a chance de excedências dos limites operacionais durante os períodos críticos do ano.

Um fator crucial na interpretação desses resultados é a definição dos limites operacionais, que exerce um impacto significativo na quantidade de excedências observadas. Na série temporal referente ao ponto 3 da rota marítima (ver Anexo, Figura A4), que também está dentro da área RS-19, verifica-se que, ao adotar o limite de 45 kW/m, o número de excedências é substancialmente maior em comparação com o limite de 80 kW/m. Essa diferença reflete diretamente a escolha dos critérios, onde o limite de 45 kW/m está associado a um H_s de 3 m, enquanto o limite de 80 kW/m corresponde a um H_s de 4 m. Essa distinção é fundamental para a operação segura de diferentes tipos de embarcações, pois cada limite operacional deve ser adaptado às características específicas dos navios envolvidos nas operações. No gráfico da parte inferior da figura (ver Anexo, Figura A4), observa-se que, ao longo dos 22 anos analisados, o limite de 45 kW/m resulta em um total de 891 dias de excedência, comparado aos 211 dias registrados para o limite de 80 kW/m. Isso reforça a importância de uma definição criteriosa dos limites operacionais, que deve ser ajustada com base nas características do navio e na interação com as ondas, garantindo que as operações sejam conduzidas com segurança.

Além disso, o percentual de excedência dos limites operacionais ao longo dos anos de 2001 a 2022 apresenta uma variação significativa (ver Anexo, Figura A5). Na primeira metade da série temporal (2001-2011), os valores oscilam em torno de 1% para a rota marítima e 5% para a área RS-19, sem grandes aumentos. Contudo, a partir de 2012, observa-se um crescimento gradual no percentual de excedências, especialmente na segunda metade do período, sugerindo um possível incremento, que deve ser melhor investigado em trabalhos futuros, na frequência e intensidade dos eventos em que o P_w ultrapassa os limites operacionais. Este comportamento está em consonância com estudos recentes, como o de Gramcianinov *et al.* (2023), que identificam um aumento nos eventos extremos de ondas ao longo da costa sul do Brasil.

Essa tendência de aumento nas condições extremas reforça a importância de incluir as mudanças climáticas no planejamento de operações de transporte e na instalação de aerogeradores *offshore*. À medida que a frequência e intensidade dos eventos extremos crescem, é fundamental ajustar as estratégias e revisar os limites de segurança, garantindo que as futuras operações sejam executadas de forma segura em um cenário cada vez mais desafiador.

4.5 Ferramenta de auxílio à decisão

A análise do P_w com base em dados históricos é uma ferramenta muito útil para o planejamento de operações marítimas, como demonstrado nos resultados das subseções anteriores. A compreensão da distribuição espacial de P_w , bem como a identificação dos períodos críticos ao longo do ano, permite mapear as áreas de maior risco de excedência dos limites operacionais e definir os melhores períodos para realizar operações com segurança, minimizando a exposição a condições de mar adversas.

No entanto, apesar do estudo histórico fornecer uma base robusta para a avaliação de riscos, ele não pode ser a única fonte de informação em contextos operacionais dinâmicos, onde as condições de mar podem mudar rapidamente. Por isso, é fundamental uma abordagem complementar que não se limite à análise de tendências passadas, mas que integre previsões do estado do mar para os dias em que as operações estão planejadas. Nesse contexto, o uso de modelos de ondas

que oferecem prognósticos confiáveis para o futuro próximo torna-se uma ferramenta indispensável para a tomada de decisão.

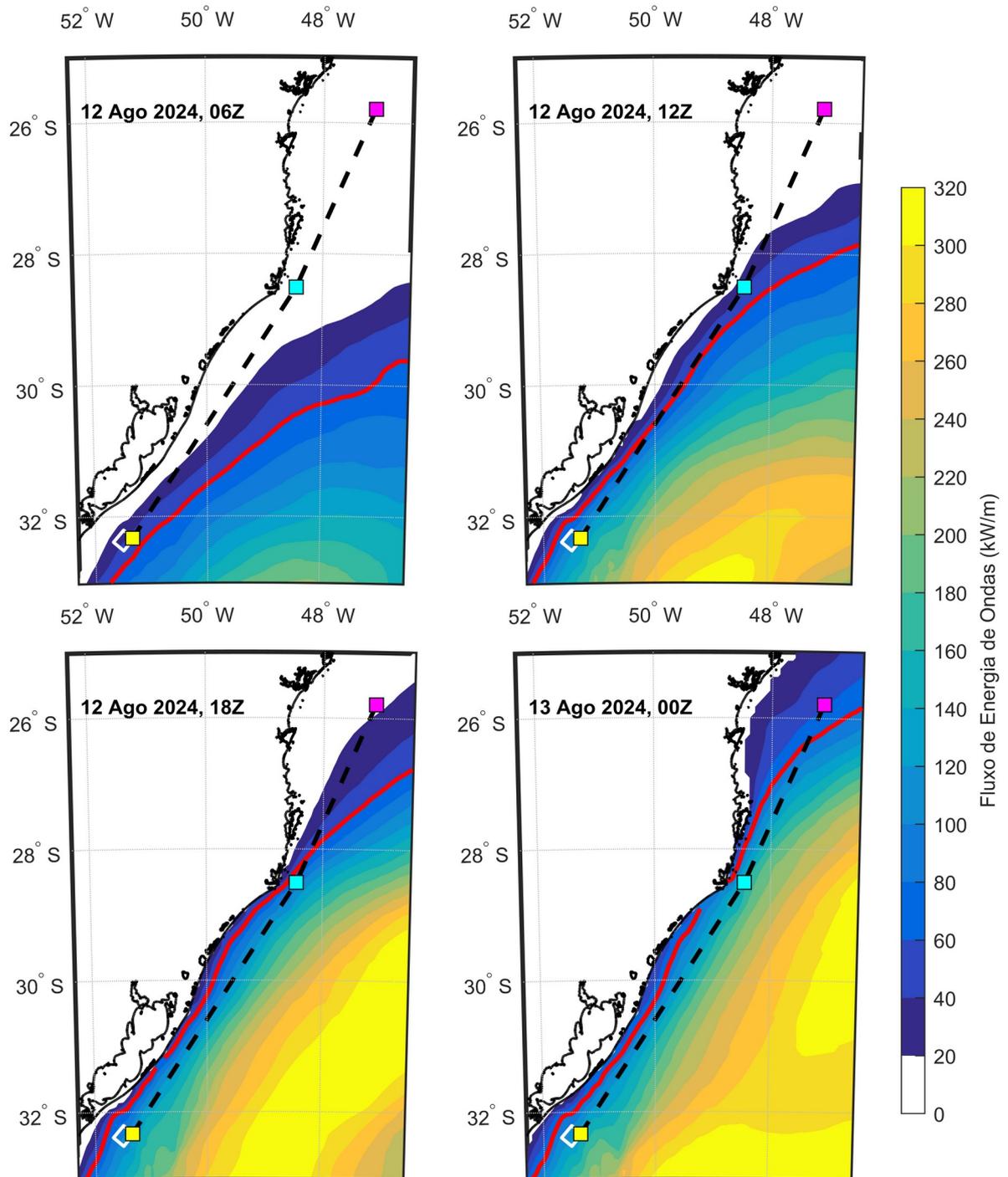
Um avanço significativo nesse sentido é a introdução de mapas de P_w gerados a partir das previsões de ondas do modelo WW3 do CHM. Esses mapas são desenvolvidos para servir como uma ferramenta de auxílio à decisão, fornecendo previsões detalhadas das condições de onda. Eles são especialmente úteis para identificar áreas onde os limites operacionais podem ser excedidos, facilitando a visualização clara das zonas seguras e das áreas de maior risco para navegação e operações *offshore*.

A Figura 5 ilustra um exemplo dessa ferramenta de apoio, com mapas de P_w gerados a partir do modelo WW3. O modelo fornece previsões de alta resolução, tanto espacial, com grade de 4 km, quanto temporal, com prognósticos a cada 1 hora, permitindo uma análise precisa das condições de onda. Na figura, os mapas mostram a evolução de P_w a cada 6 horas, cobrindo o período de 12 de agosto de 2024, às 06 horas (fuso Z) até 13 de agosto de 2024, às 00 horas (fuso Z). A escala de cores varia do azul, representando os menores valores de P_w , até o vermelho, que denota os valores mais elevados. Além disso, a rota marítima (representada pela linha preta tracejada) e a área RS-19 "Querência" (destacada pela linha branca) estão claramente delineadas nos mapas. Também está incluída a linha de limite operacional (indicada pela linha vermelha), que corresponde a $P_w = 80$ kW/m, facilitando a visualização das áreas onde esse valor é excedido e, portanto, onde as operações se tornam mais arriscadas. Outros elementos relevantes incluem os pontos da rota: ponto 1 (quadrado magenta), ponto 2 (quadrado azul), e ponto 3 (quadrado amarelo). A linha de costa é destacada em preto, proporcionando uma referência geográfica adicional para a análise.

No primeiro quadro, referente à 12 de agosto às 06Z, o mapa mostra que tanto a rota marítima quanto a área RS-19 estão localizadas dentro de uma zona segura, onde o P_w se mantém abaixo do limite operacional. A linha de limite operacional, que separa as zonas de segurança das áreas de risco, está posicionada mais afastada da costa, na direção sudeste-nordeste. Já no segundo quadro, às 12Z, a situação se altera, com a linha de limite avançando em direção à costa e movendo-se para o norte, colocando o ponto 3, na extremidade sul da rota, e a área RS-19 na zona de risco, onde o P_w ultrapassa o limite operacional, sugerindo condições perigosas para a navegação e as operações na região. No terceiro

quadro, às 18Z, a linha de limite continua a se deslocar, desta vez atingindo o ponto 2 da rota, e finalmente, no quarto quadro, às 00Z de 13 de agosto, a linha de limite operacional se aproxima ainda mais do ponto 1, expandindo a área de maior risco ao longo da rota marítima.

Figura 5: Ferramenta de auxílio à decisão: mapas de previsão de fluxo de energia de ondas.



Fonte: O Autor.

Essa ferramenta de auxílio à decisão, baseada em mapas de P_w gerados a partir das previsões do modelo WW3, oferece uma vantagem operacional significativa ao permitir a geração de previsões de alta precisão, com intervalos de atualização horária e prognósticos que podem se estender por até 5 dias. Essa capacidade oferece uma flexibilidade estratégica essencial para operadores marítimos e gestores de projetos *offshore*, proporcionando informações detalhadas sobre as condições de onda esperada. Dessa forma, o planejamento das operações pode ser ajustado com base nas condições mais recentes, garantindo uma execução mais segura e eficiente.

Além de fornecer uma previsão precisa das condições de onda, essa ferramenta permite uma avaliação dinâmica e contínua dos riscos, possibilitando uma rápida adaptação às mudanças nas condições de mar. A combinação de dados de alta resolução espacial e temporal aprimora a capacidade de resposta dos operadores, permitindo que decisões sejam tomadas com antecedência, evitando interrupções e minimizando os riscos operacionais.

A possibilidade de visualizar a evolução das condições de onda ao longo do tempo também facilita a antecipação de janelas operacionais mais seguras, reduzindo a exposição a riscos desnecessários. O uso de modelos prognósticos eleva o nível de confiabilidade no processo de tomada de decisão. Isso é especialmente relevante para operações críticas, como o transporte de cargas ou a instalação de aerogeradores *offshore*, onde a previsibilidade do estado do mar é crucial.

Portanto, essa ferramenta não apenas oferece suporte direto para a tomada de decisão, mas também proporciona uma base para o planejamento de operações a longo prazo, contribuindo com a segurança, reduzindo riscos e maximizando a eficiência, mesmo em um ambiente muito dinâmico.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais deste estudo buscam sintetizar as principais contribuições da pesquisa realizada, além de implicações dos resultados obtidos e recomendações para futuros trabalhos. O estudo propôs a análise das condições de onda na costa sul do Brasil, considerando o transporte marítimo de componentes eólicos *offshore*, com foco na segurança da navegação. Para isso, foram utilizados

dados de reanálise do *Waverys* e considerados limites operacionais de navios de carga pesada.

Um ponto de destaque refere-se à proposta do uso do fluxo de energia de ondas como um indicador do estado do mar para fins de avaliação de rotas marítimas e segurança da navegação. Esse parâmetro, que combina a altura significativa das ondas e o período de pico, oferece uma avaliação mais robusta das condições de navegação e operação *offshore* em comparação ao uso isolado de parâmetros de onda. Ao adotar o fluxo de energia de ondas como critério, o estudo conseguiu integrar de maneira eficaz as variáveis ambientais e operacionais, fornecendo uma ferramenta confiável para a avaliação de rotas marítimas, análise das condições de transporte marítimo de cargas pesadas e previsão de janelas operacionais adequadas para a instalação de aerogeradores.

O estudo analisou as condições de onda ao longo da rota marítima e na área RS-19 "Querência", na costa sul do Brasil, para avaliar a área de interesse, considerando o limite operacional de navios de carga pesada durante o transporte e a instalação de parques eólicos *offshore*. A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que, embora o fluxo de energia de ondas na maior parte do tempo permaneça dentro dos limites operacionais, existem períodos críticos, especialmente durante o outono e inverno, quando o risco de excedência aumenta significativamente. Isso reforça a necessidade de um monitoramento cuidadoso e de uma avaliação contínua das condições de onda ao longo do ano.

A avaliação da rota marítima revelou que o mês de maio é o mais crítico, com o maior risco de excedências dos limites operacionais. De forma semelhante, na área RS-19, o mês de maio também apresenta o maior número de excedências, seguido por setembro e julho. Essas informações são relevantes para a escolha do período ideal para realizar o transporte de aerogeradores e a instalação dos parques eólicos *offshore*, minimizando os riscos associados.

Em relação as questões de pesquisa, foi possível concluir que a rota marítima mais frequentemente utilizada ao longo da costa sul do Brasil é, em termos gerais, adequada em relação aos limites operacionais adotados, considerando as condições de onda e características de navios de carga pesada. Além disso, os meses de verão oferecem condições mais favoráveis, criando janelas operacionais ideais para a realização de atividades críticas. Especificamente, janeiro e março se destacam como períodos mais adequados para o transporte de aerogeradores e seus

componentes, enquanto janeiro, fevereiro e dezembro são mais propícios para as operações de instalação dos mesmos. Assim, a escolha do momento adequado para realizar essas operações possibilita maximizar a viabilidade do projeto na área de estudo.

Outro ponto de destaque é a implementação de uma ferramenta de auxílio à decisão, baseada em mapas de fluxo de energia de ondas elaborados a partir da previsão de ondas do modelo WW3 do Centro de Hidrografia da Marinha, que tem um grande potencial para a mitigação dos riscos associados às operações *offshore*. Essa ferramenta permite uma avaliação dinâmica das condições de onda, proporcionando informações atualizadas, o que facilita a coordenação das operações. A capacidade de gerar os mapas horários de fluxo de energia de ondas para até 5 dias de prognóstico é uma vantagem significativa, pois oferece aos operadores uma base sólida para a tomada de decisões, contribuindo para a segurança da navegação e a eficácia das operações.

Para aprofundar o entendimento dos desafios operacionais enfrentados no transporte e instalação de aerogeradores *offshore*, futuras pesquisas poderiam explorar o impacto de outros fatores ambientais, como o vento, as correntes oceânicas e a direção das ondas. A influência combinada dessas variáveis pode afetar a navegação e a estabilidade dos navios durante as operações, e sua análise pode fornecer uma visão ampliada e precisa das condições adversas encontradas na costa sul do Brasil.

Além disso, a investigação aprofundada sobre o aumento de eventos extremos de ondas e seus impactos nas operações *offshore* pode revelar padrões emergentes e fornecer informações importantes para adaptar essas operações às mudanças climáticas. Isso inclui a necessidade de atualizar protocolos de segurança e estudar tecnologias de monitoramento e mitigação para minimizar os riscos associados. A reavaliação periódica desses protocolos, levando em conta as novas tendências climáticas e as condições das ondas, é crucial para garantir a segurança e a continuidade das operações.

Por fim, a metodologia, baseada em dados históricos e mapas de fluxo de energia de ondas, mostrou-se eficaz na avaliação de rotas e áreas específicas, com potencial para aplicação em outras regiões. Sua versatilidade permite seu uso tanto por gestores de projetos *offshore* quanto diretamente a bordo dos navios, podendo também ser integrado a cartas digitais com as devidas adaptações, garantindo um

monitoramento contínuo das condições do mar. A adaptabilidade da ferramenta a diferentes embarcações e cenários reforça seu caráter inovador, com significativo potencial de impacto no planejamento e execução de operações *offshore*, mas também aplicável em operações navais.

REFERÊNCIAS

ACERO, W. G.; LI, L.; GAO, Z.; MOAN, T. Methodology for assessment of the operational limits and operability of marine operations. **Ocean Engineering**, v. 125, p. 308-327, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.08.015>. Acesso em 20 ago. 2024.

ARAUJO, T. A. A.; LÉLLIS, F. S.; CORREIA, F. R. S.; MORENO, D.; SILVA, M. V. Análise de eventos de ressaca na costa brasileira através do fluxo de energia das ondas. **Anais Hidrográficos**. v. 75, p. 161-175, 2018. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/dhn/sites/www.marinha.mil.br.dhn/files/anais/Anais_Hidrograficos_2018_0.pdf. Acesso em 09 abr. 2024.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama). **96 projetos de complexos eólicos offshore aguardam regulamentação**. IBAMA, 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/noticias/2024/96-projetos-de-complexos-eolicos-offshore-aguardam-regulamentacao>. Acesso em: 9 abril 2024.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama). **Usinas Eólicas Offshore**. Brasília: IBAMA, 2024b. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/arquivos/20240507_Usinas_Eolicas_Offshore.pdf. Acesso em: 26 ago. 2024.

BRASIL. Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais – INDE. **Visualizador: MB/COMPAAz – Camada- 2022- Cargueiro (anual)**. INDE, 2024. Disponível em: <https://visualizador.inde.gov.br/>. Acesso em: 26 ago. 2024.

BRASIL. Marinha do Brasil. **Plano Estratégico da Marinha (PEM 2040)**. Estado-Maior da Armada, Brasília, 2020b.

BRASIL. Marinha do Brasil. **Norma da Autoridade Marítima para Atividades de Meteorologia Marítima (NORMAM-701)**. NORMAM-701, 2023. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/dhn/sites/www.marinha.mil.br.dhn/files/normam/NORMAM-701.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2024.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Política Nacional de Defesa. Estratégia Nacional de Defesa**. Brasília, 2020a.

CAMPOS, R. M.; CAMARGO, R.; HARARI, J. Caracterização de eventos extremos do nível do mar em Santos e sua correspondência com as reanálises do modelo do NCEP no sudoeste do Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, p. 175, 2010.

CAMPOS, R. M.; D'AGOSTINI, A.; FRANÇA, B. R. L.; DAMIÃO, A. L. A.; SOARES, C. G. Implementation of a multi-grid operational wave forecast in the South Atlantic Ocean. **Ocean Engineering**, Lisboa, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110173>.

COREWIND Project. **D4.2 Floating Wind O&M Strategies Assessment**. 2021.

(Relatório técnico). Disponível em:

<https://corewind.eu/wp-content/uploads/files/publications/COREWIND-D4.2-Floating-Wind-O-and-M-Strategies-Assessment.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2024.

DIAS, J. M. A.; POLETTE, M.; CARMO, J. A. Período de Pico. In: DIAS, J. A.; POLETTE, M.; CARMO, J. A. (Eds.). *Glossário da Revista de Gestão Costeira Integrada*. Revista de Gestão Costeira Integrada, v. 7, n. 1, 2007. Disponível em: https://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci_7-1.pdf. Acesso em: 26 ago. 2024.

ESPINDOLA, R. L. **Mapeamento de sites com potencial para geração de energia ondomotriz por meio de análise de decisão multicritério**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/28040>. Acesso em: 09 jul. 2024.

GERMOND, B.; MAZARIS, A. D. Climate change and maritime security. **Marine Policy**, v. 99, p. 262-266, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.10.010>. Acesso em: 16 jun. 2024.

GRAMCIANINOV, C.; HODGES, K.; DE CAMARGO, R. The properties and genesis environments of South Atlantic cyclones. **Climate Dynamics**, v. 53, p. 4115–4140, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04778-1>. Acesso em 16 jun. 2024.

HOLTHUIJSEN, L. H. **Waves in Oceanic and Coastal Waters**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2007. 405 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511618536>.

INNOCENTINI, V.; CAETANO, E.; CARVALHO, J. T. A Procedure for Operational Use of Wave Hindcasts to Identify Landfall of Heavy Swell. **Weather and Forecasting**, v. 29, p. 349–365, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-13-00077.1>. Acesso em 15 jun. 2024.

LAW-CHUNE, S., AOUF, L., DALPHINET, A. et al. WAVERYS: a CMEMS global wave reanalysis during the altimetry period. **Ocean Dynamics**, v. 71, p. 357–378, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01433-w>. Acesso em 10 mai. 2024.

LI, Lin; HAVER, Sverre; BERLIN, Nikita. Assessment of operational limits: Effects of uncertainties in sea state description. **Marine Structures**, v. 77, p. 102975, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2021.102975>.

ORTIZ, G.; KAMPEL, S. Potencial de energia eólica offshore na margem do Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Oceanografia, 5, 2011, Santos. **Anais** [...]. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265894758_Potencial_De_Energia_Eolica_Offshore_Na_Margem_Do_Brasil. Acesso em: 10 jun. 2024.

PIANCA, C.; MAZZINI, P. L. F.; SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 58, p. 53-70, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjoce/a/QZz4kzgzHKSxKT4PdBr3wf5x/?lang=en#>. Acesso em 15 jun. 2024.

RATHJE, H. Weather-restricted Sea Transports Aboard Heavy Lift Ships. In: Duisburger Kolloquium Schiffstechnik / Meerestechnik: The Ship and the Offshore Wind-Energy, 36, 2018, Duisburgo – Alemanha. **Anais** [...]. Disponível em: <https://www.skuld.com/contentassets/db742b04ac4541ca9e989923c99564a4/weather-restricted-sea-transports-aboard-heavy-lift-ships.pdf>. Acesso em 10 jun. 2024.

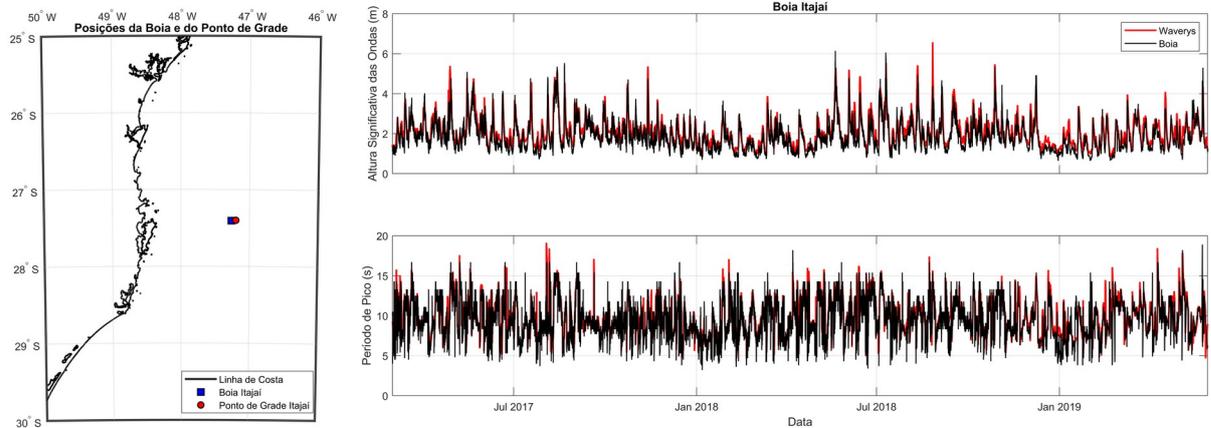
SONDERMANN, M.; CHOU, S.; SOUZA, C., *et al.* Atmospheric patterns favourable to storm surge events on the coast of São Paulo State, Brazil. **Natural Hazards**, v. 117, p. 93, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05851-z>. Acesso em 05 mai. 2024.

TECCHIO, R. **Desenvolvimento de escala de classificação e de ferramentas de previsão de ressacas para a costa S/SE do Brasil, com base no fluxo de energia das ondas**. 2024. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.14.2024.tde-07052024-115342>. Acesso em 07 jun. 2024.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981. DOI: <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>. Acesso em 11 abr. 2024.

ANEXO

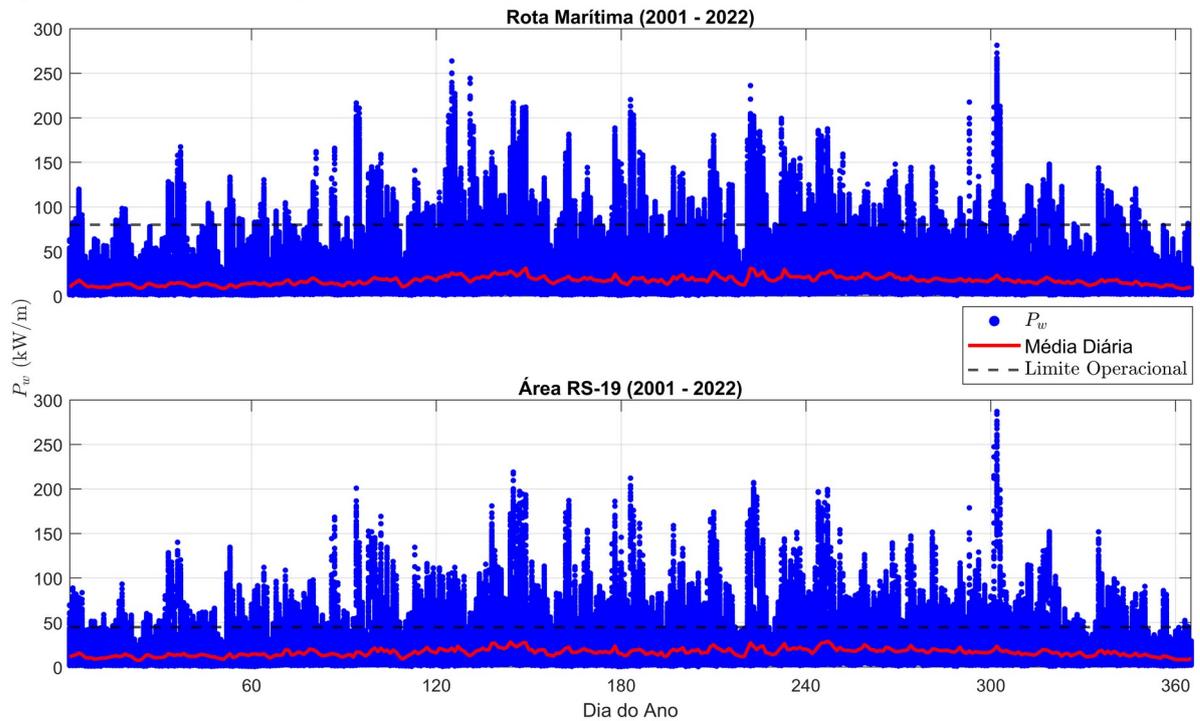
Figura A1 - Validação dos dados do Waverys.



Fonte: O Autor.

Nota: Esta figura complementa as subseções 3.2 e 4.1. O quadro à esquerda ilustra a boia localizada a 60 MN da costa de Itajaí (quadrado azul), 27,406° S e 47,265° O, e ponto de grade do Waverys mais próximo à boia (círculo vermelho), situado em 27,4° S e 47,2° O, a uma distância de 6,6 km da boia. O quadro à direita apresenta duas séries temporais com a comparação entre os dados do Waverys e as observações da boia para altura significativa de onda (parte superior) e período de pico da onda (parte inferior).

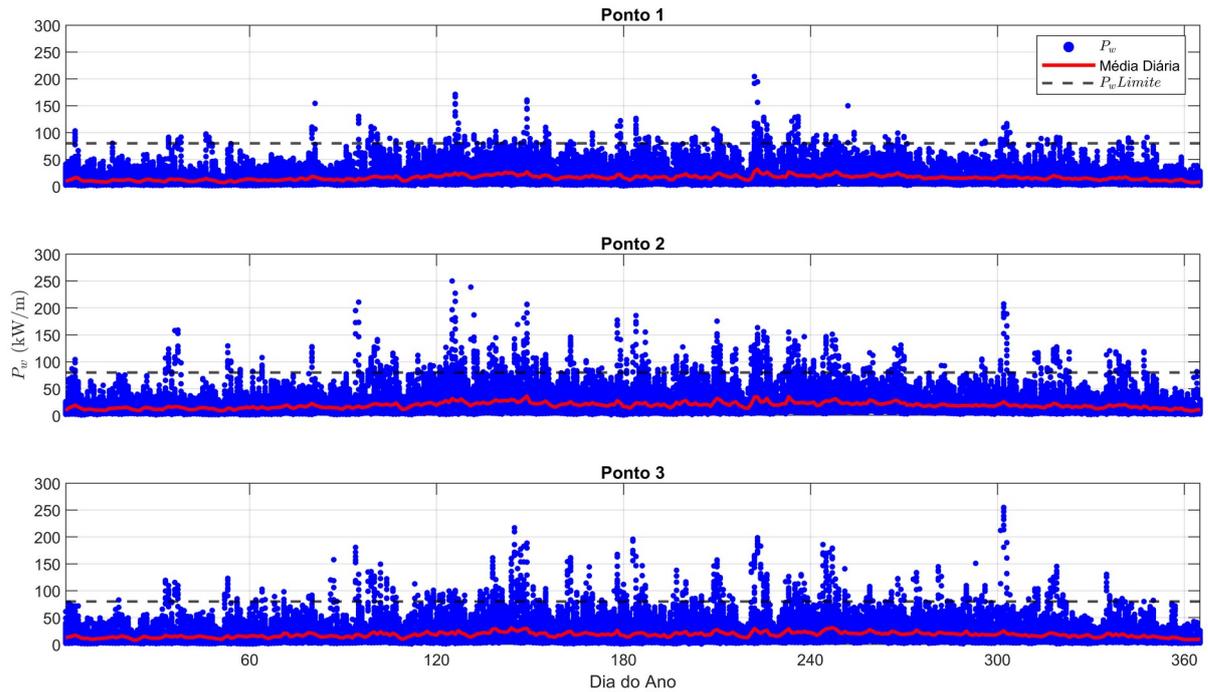
Figura A2 - Fluxo de energia de ondas nos pontos seleccionados.



Fonte: O Autor.

Nota: Esta figura complementa a subseção 4.3.

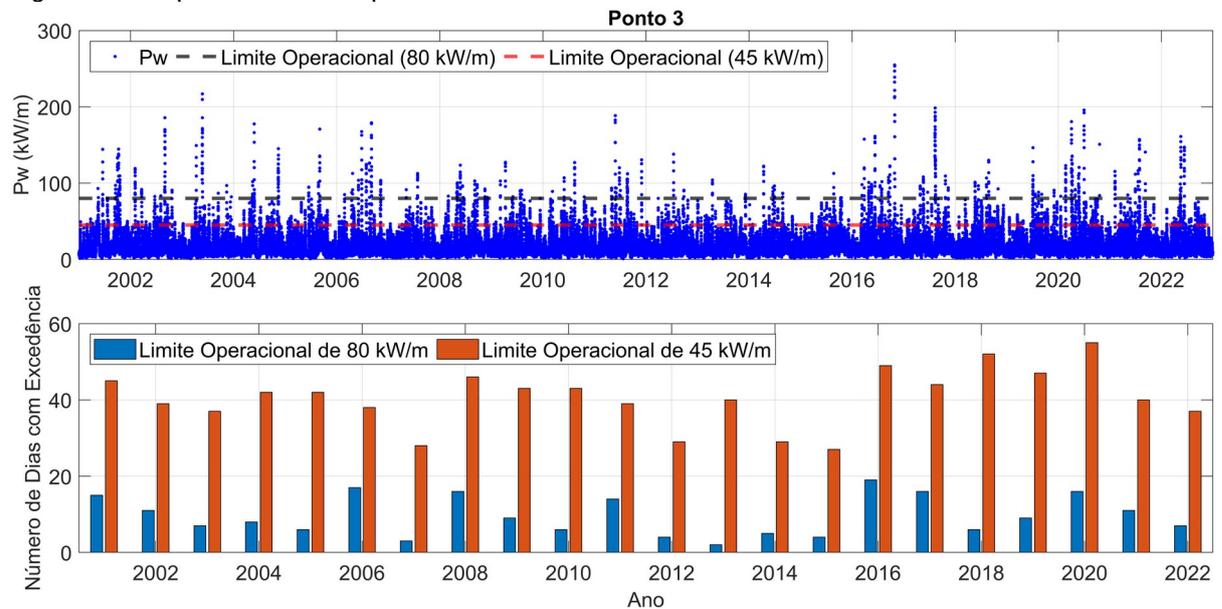
Figura A3 - Fluxo de energia de ondas nos pontos 1, 2 e 3.



Fonte: O Autor.

Nota: Esta figura complementa a subseção 4.3.

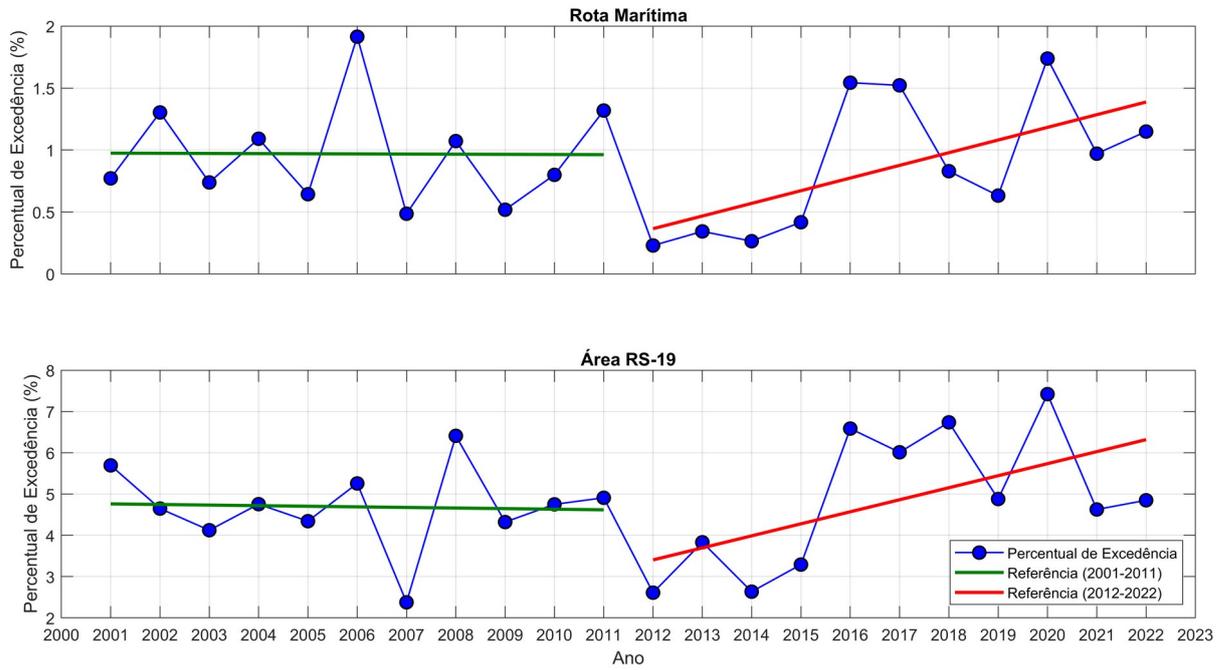
Figura A4 - Impacto do limite operacional.



Fonte: O Autor.

Nota: Esta figura complementa a subseção 4.4.

Figura A5 - Percentual de excedência anual.



Fonte: O Autor.

Nota: Esta figura complementa a subseção 4.4.