



ANÁLISE DE JANELAS DE MANUTENÇÃO PARA UM WEC A INSTALAR NO PORTO DE SINES, PORTUGAL

FELIPE ROTH
outubro de 2025

**ANÁLISE DE JANELAS DE MANUTENÇÃO PARA UM
WEC A INSTALAR NO PORTO DE SINES, PORTUGAL**
Felipe Roth

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Energia**

Orientador: Tiago André Abreu, Doutor, ISEP

Co-orientador: Durval João de Barba Júnior, Doutor, IFSul

Júri:

Presidente:

Elza Maria Morais Fonseca, Professor Coordenador com Agregação, ISEP

Vogais:

Paulo Manuel Cruz Alves da Silva, Professor Associado, Universidade de Aveiro

Tiago André Abreu, Professor Coordenador, ISEP

Porto, outubro de 2025

Agradecimentos

A Deus, pelas oportunidades, bênçãos e proteção ao longo de minha trajetória. Aos meus familiares e amigos, dirijo meus mais sinceros agradecimentos, pelo apoio e incentivo.

Expresso meu reconhecimento especial às instituições e às pessoas que contribuíram diretamente para a realização desta dissertação:

- Ao Instituto Federal Sul-rio-grandense, pelos conhecimentos e experiências proporcionadas, em especial pela oportunidade de participar do programa de dupla titulação IFSUL-IPP/ISEP. Agradeço cordialmente ao Professor Doutor Pedro Carlos Hernandez Júnior e ao Professor Doutor Luís Ricardo Pedra Pierobon.
- Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, pela acolhida e suporte durante toda a realização deste trabalho. Em especial, agradeço ao Gabinete de Relações Externas pelo auxílio prestativo e aos integrantes do Departamento de Engenharia Mecânica pelos ensinamentos.
- Ao projeto NEXUS – Pacto de Inovação: Transição Verde e Digital para Transportes, Logística e Mobilidade, financiado pelo PRR – Plano de Recuperação e Resiliência e pelos fundos *NextGenerationEU* através da Universidade de Aveiro (Projeto n.º 53, candidatura C645112083-00000059), agradeço pela oportunidade de desenvolver esta dissertação.
- Ao meu orientador, Professor Doutor Tiago André Abreu, pela paciência, dedicação e valiosos ensinamentos compartilhados. Sua orientação foi essencial, e sem seu apoio e confiança, este trabalho não teria sido possível.
- Agradeço também aos meus amigos, que estiveram presentes em cada etapa desta jornada, pelas palavras de incentivo, amizade sincera, companheirismo e alegria, tornando os desafios mais leves e os momentos de conquista ainda mais significativos.

Por fim, à minha família, pelo amor, cuidado e suporte incondicional que me permitiram chegar até aqui. Em especial:

- À minha esposa, Amanda, meu grande amor e companheira de vida, agradeço profundamente pelo apoio constante, carinho, dedicação e incentivo. Admiro-te intensamente e dedico-te este trabalho com todo o meu coração.
- À minha filha, Alice, por nos motivar diariamente com seu sorriso radiante e afeto incondicional. Espero que este trabalho sirva de inspiração para sua própria trajetória pessoal e acadêmica. Dedico-te este trabalho com todo amor e orgulho.
- Aos meus pais, Eloi e Dionice, pela educação exemplar, amor constante e suporte incondicional, que formaram a base de minha vida e de minhas conquistas.
- À minha irmã, Caroline, e à minha sobrinha, Aurora, pelo apoio e incentivo.
- Ao meu sogro, Armando (*in memoriam*), pelos momentos compartilhados, ensinamentos e apoio, que permanecem como inspiração.
- À minha sogra, Elisabeth, e à minha cunhada, Manuela, pelo carinho, cuidado e ensinamentos que tornaram minha trajetória ainda mais rica e significativa.

Resumo

A implementação de conversores de energia das ondas (WEC) representa uma alternativa renovável e sustentável para diversificação da matriz energética, embora ainda se trate de uma tecnologia em desenvolvimento. Este estudo analisou as janelas de manutenção disponíveis para a operação de um WEC do tipo REEFS localizado no Porto de Sines, Portugal, utilizando dados de reanálise ERA5 referentes ao período de 1940 a 2020. Foram definidos quatro cenários de acessibilidade para a realização das operações de manutenção, compostos por um cenário de referência e três cenários adicionais que ampliam ou restringem as condições de operação a partir de diferentes combinações entre a altura significativa das ondas (H_s) e o período de pico (T_p). Essa abordagem permitiu avaliar a sensibilidade da disponibilidade operacional do sistema face às variações das condições marítimas, identificando os limites de segurança e a probabilidade de acesso ao dispositivo. A análise estatística incluiu o cálculo da média, desvio padrão e variabilidade das horas de acessibilidade, bem como o número e a duração das janelas de manutenção e dos períodos de inacessibilidade. Observou-se que a acessibilidade apresenta comportamento sazonal, sendo geralmente mais favorável durante os meses de primavera e verão, quando as condições do mar são mais estáveis e propícias à realização de operações. Por outro lado, o outono e o inverno, revelaram maior variabilidade e ocorrência de períodos prolongados de inacessibilidade, o que exige planeamento estratégico para minimizar riscos e otimizar os recursos operacionais. Os resultados obtidos fornecem uma visão abrangente da disponibilidade operacional de um WEC ao longo do ano, contribuindo para o planeamento da operação e manutenção, bem como para a otimização do aproveitamento energético do recurso das ondas na região do Porto de Sines.

Palavras-chave: Manutenção, Conversor de energia de ondas, REEFS, ERA5, Janelas meteorológicas.

Abstract

The implementation of Wave Energy Converters (WECs) represents a renewable and sustainable alternative for the diversification of the energy matrix, although it remains a developing technology. This study analyzed the maintenance windows available for the operation of a REEFS-type WEC located at the Port of Sines, Portugal, using ERA5 reanalysis data covering the period from 1940 to 2020. Four accessibility scenarios were defined for maintenance operations, consisting of a reference scenario and three additional scenarios that either broaden or restrict the operating conditions based on different combinations of significant wave height (H_s) and peak period (T_p). This approach allowed for the assessment of the system's operational availability sensitivity to variations in sea state conditions, identifying safety limits and the likelihood of device accessibility. The statistical analysis included the calculation of the mean, standard deviation, and variability of accessible hours, as well as the number and duration of maintenance windows and periods of inaccessibility. It was observed that accessibility exhibits a seasonal pattern, being generally more favorable during spring and summer months when sea conditions are more stable and suitable for operations. Conversely, autumn and winter showed greater variability and longer periods of inaccessibility, requiring strategic planning to minimize risks and optimize operational resources. The results provide a comprehensive overview of the operational availability of a WEC throughout the year, contributing to the planning of operation and maintenance activities and to the optimization of wave energy resource utilization in the Port of Sines region.

KEYWORDS: Maintenance, Wave Energy Converter, REEFS, ERA5, Weather Windows.

Índice

Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xiv
Acrónimos e Símbolos.....	xvi
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento da dissertação	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo geral.....	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Justificativa	3
1.4. Estrutura da dissertação	4
2. Revisão Bibliográfica	6
2.1. Energias renováveis e o papel da energia das ondas.....	6
2.2. Conversores de energia das ondas: tecnologias e classificações.....	6
2.3. Os desafios da O&M.....	8
2.4. Portugal: estudo de caso.....	10
2.5. Critérios de acesso por condições de mar	11
3. Métodos e Aplicação.....	12
3.1. Dados meteorológicos	12
3.2. Dados de reanálise	12
3.3. Limites de acessibilidade para O&M.....	13
3.4. Aplicação ao caso de estudo	15
3.4.1. Porto de Sines (Sines, Portugal).....	15
3.4.2. O&M do WEC REEFS	17
4. Resultados e Discussão	18
4.1. Validação de dados ERA5	18
4.2. Caracterização da agitação marítima.....	20
4.3. Cenário 1 como critério de acessibilidade	23
4.3.1. Variabilidade Anual	23
4.3.2. Variabilidade mensal.....	25
4.3.3. Variabilidade sazonal	27
4.3.4. Variabilidade anual de inacessibilidade	28
4.4. Cenário de Gray et al., 2015 como critério de acessibilidade.....	29
4.4.1. Variabilidade Anual	29
4.4.2. Variabilidade Mensal	32
4.4.3. Variabilidade Sazonal.....	34

4.4.4. Variabilidade anual de inacessibilidade	34
4.5. Cenário 2 como critério de acessibilidade	35
4.5.1. Variabilidade Anual	35
4.5.2. Variabilidade Mensal	38
4.5.3. Variabilidade Sazonal	39
4.5.4. Variabilidade anual de inacessibilidade	40
4.6. Cenário 3 como critério de acessibilidade	41
4.6.1. Variabilidade Anual	41
4.6.2. Variabilidade Mensal	44
4.6.3. Variabilidade Sazonal	45
4.6.4. Variabilidade anual de inacessibilidade	46
4.7. Variabilidade sazonal de inacessibilidade dos diferentes cenários	47
5. Conclusão	52
5.1. Conclusões finais	52
5.2. Limitações e trabalhos futuros	55
Referências	57
Declaração de Integridade	62

Lista de Figuras

Figura 1 – Matriz energética de Portugal (DGEG, 2025).	2
Figura 2 – Dispositivos conversores de energia das ondas: a) Attenuator; b) Point Absorber; c) OWSC; d) OWC; e) Overtopping/Terminator Device; f) Submerged Pressure Differential; g) Bulge Wave; h) Rotating Mass (Aqua-RET Project, 2012).	8
Figura 3 – Classificação dos WEC relacionada a sua respetiva profundidade de instalação.	8
Figura 4 – Dispositivo Renewable Electric Energy From Sea (REEFS) e, respetivamente: a) seu princípio de funcionamento; e b) sua representação gráfica (De Almeida, 2017).	10
Figura 5 – Limites de acessibilidade para O&M (Adaptado de Gray et al., 2015).	13
Figura 6 – Novos limites de acessibilidade para O&M.	14
Figura 7 – Ponto de estudo (ilustração realizada através da ferramenta Google Earth (https://earth.google.com/)).	16
Figura 8 – Dados in situ com validação ERA5 (Dos Santos, 2023).	20
Figura 9 – Mapa de calor dos estados de mar.	21
Figura 10 – Percentual de ocorrência de diferentes valores de Hs.	22
Figura 11 – Percentual de ocorrência de diferentes valores de Tp.	22
Figura 12 – Percentual de ocorrência de diferentes valores para diferentes classes de direção de propagação das ondas (cada classe corresponde a um intervalo de 22,5°).	23
Figura 13 – Mapa de calor delimitado pelos critérios de acessibilidade.	23
Figura 14 – Média anual de dias acessíveis.	24
Figura 15 – Janelas anuais de manutenção.	25
Figura 16 – Tempo médio mensal de acessibilidade.	26
Figura 17 – Tempo médio e desvio padrão mensal de acessibilidade.	27
Figura 18 – Tempo médio sazonal de acessibilidade.	28
Figura 19 – Média anual de dias inacessíveis.	29
Figura 20 – Mapa de calor delimitado pelos critérios de acessibilidade.	30
Figura 21 – Média anual de dias acessíveis.	31
Figura 22 – Janelas anuais de manutenção.	32
Figura 23 – Tempo médio mensal de acessibilidade.	33
Figura 24 – Tempo médio e desvio padrão mensal de acessibilidade.	33
Figura 25 – Tempo médio sazonal de acessibilidade.	34
Figura 26 – Média anual de dias inacessíveis.	35
Figura 27 – Mapa de calor delimitado pelos critérios de acessibilidade.	36
Figura 28 – Média anual de dias acessíveis.	37
Figura 29 – Janelas anuais de manutenção.	37
Figura 30 – Tempo médio mensal de acessibilidade.	38
Figura 31 – Tempo médio e desvio padrão mensal de acessibilidade.	39
Figura 32 – Tempo médio sazonal de acessibilidade.	40
Figura 33 – Média anual de dias inacessíveis.	41
Figura 34 – Mapa de calor delimitado pelos critérios de acessibilidade.	42
Figura 35 – Média anual de dias acessíveis.	43

Figura 36 – Janelas anuais de manutenção.....	43
Figura 37 – Tempo médio mensal de acessibilidade.	44
Figura 38 – Tempo médio e desvio padrão mensal de acessibilidade.....	45
Figura 39 – Tempo médio sazonal de acessibilidade.	46
Figura 40 – Média anual de dias inacessíveis.....	47
Figura 41 – Persistência das condições de inacessibilidade vs Probabilidade acumulada para o inverno.	48
Figura 42 – Persistência das condições de inacessibilidade vs Probabilidade acumulada para a primavera.	49
Figura 43 – Persistência das condições de inacessibilidade vs Probabilidade acumulada para o verão.	50
Figura 44 – Persistência das condições de inacessibilidade vs Probabilidade acumulada para o outono.....	51

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tipos de WEC, seus princípios de funcionamento e suas características relevantes..	7
Tabela 2 – Coordenadas e profundidades dos pontos ERA5 considerados.....	15

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

C3S	<i>Copernicus Climate Change Service</i>
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ERA5	<i>Fifth Generation ECMWF Reanalysis for the Global Climate and Weather</i>
FCTUC	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
GEE	Gases de Efeito Estufa
NEXUS	Pacto de Inovação – Transição Verde e Digital para Transportes, Logística e Mobilidade
O&M	Operations and Maintenance
OWC	<i>Oscillating Wave Converter</i>
OWSC	<i>Oscillating Wave Surge Converter</i>
REEFS	<i>Renewable Electric Energy From Sea</i>
WEC	<i>Wave Energy Converter</i>

Lista de Símbolos

H_s	Altura significativa de onda	m
DP	Desvio padrão	
M	Média (nas representações gráficas)	
T_p	Período de pico	s
T_e	Período de energia	s
T_m	Período médio	s
θ	Direção de onda	°

1. Introdução

1.1. Enquadramento da dissertação

O desenvolvimento global traz consigo o aumento pela demanda de consumo energético ao longo das últimas décadas. Este facto impulsiona a busca pela diversificação das fontes de energia, sobretudo aquelas que minimizam emissões de gases de efeito estufa (GEE) (Kocak et al., 2023). Tendo em vista que as estratégias tradicionais da cadeia energética são majoritariamente baseadas em recursos não-renováveis, *e.g.*, o carvão e os derivados de petróleo, são estabelecidas estratégias em conformidade às políticas globais. A energia solar é uma peça fundamental nesse contexto, mas a transição para uma matriz energética descarbonizada exige a integração de múltiplas fontes renováveis, complementares e distribuídas (Comissão Europeia, 2019; United Nations, 2016; Androniceanu & Sabie, 2022).

Portugal, por sua vez, possui elevado potencial para aplicação de energias renováveis: além das fontes solar e eólica, a região destaca-se pelo potencial inexplorado da energia dos oceanos, em especial a energia das ondas, dada a sua extensa costa atlântica e condições oceanográficas. Para a região do Porto de Sines, a potência média anual é de 20,42 kW/m (Dos Santos, 2023). Tendo em vista a dependência energética do País, a ampliação e a exploração de fontes de energias renováveis possuem forte impacto na diminuição deste factor, que tem diminuído ao longo dos anos (Majidi et al., 2025).

Do ano de 2003 até 2023 ocorreu uma transformação na matriz energética portuguesa, em que se verifica uma diminuição de 17,7% do consumo de energias provenientes de petróleo e seus derivados. O carvão não é mais utilizado como fonte de energia primária e as energias renováveis representam 34,8% do ecossistema: um crescimento expressivo, de 18,7 pontos percentuais, face a valores anteriores (Figura 1) (Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG), 2025).

Introdução

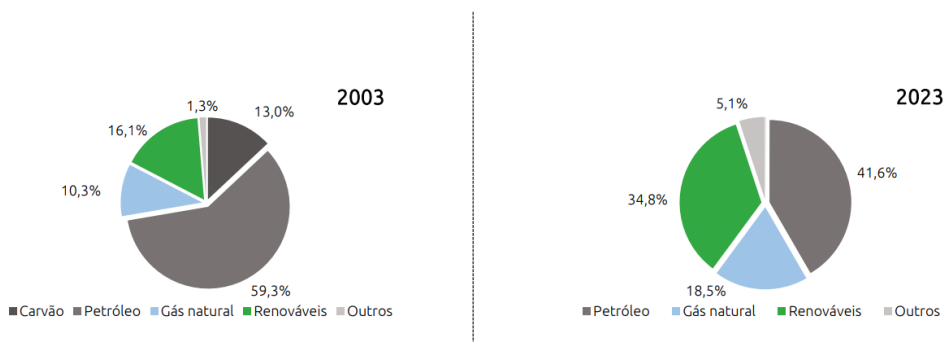


Figura 1 – Matriz energética de Portugal (DGEG, 2025).

Em relação ao potencial energético marítimo, a maturidade tecnológica dos conversores de energias das ondas (WEC – *Wave Energy Converters*) limita o seu aproveitamento, embora a sua densidade energética seja elevada (Aderinto & Li, 2018). Em adicional, é possível citar a energia das marés como opção ao aproveitamento do recurso energético marítimo (Neill et al. 2021). Além disso, há de levar-se em consideração os desafios inerentes à operação do sector, tendo em vista as condições adversas impostas pelo ambiente marítimo, *i.e.*, exposição em ambiente corrosivo, constante absorção de forças severas externas, fadiga das estruturas e componentes, bem como as dificuldades logísticas associadas à instalação, O&M (Operação e Manutenção – do inglês, *Operation and Maintenance*). A implementação de equipamentos na escala *offshore* é a que possui maior impacto consoante aos desafios apresentados, desta forma, os equipamentos em escalas *onshore* e *nearshore* trazem vantagens no âmbito da acessibilidade logística e manutenção. Portanto, neste contexto, o conceito de janelas de manutenção é de suma importância nos estudos de implementação de WEC, e pode ser definido como os períodos em que o mar possui condições climáticas favoráveis, ou seja, está suficientemente calmo, permitindo a realização de manutenções.

Para realizar uma análise abrangente e confiável, se faz necessária a utilização de conjuntos de dados de períodos mais extensos e com séries contínuas, *i.e.*, sem a ocorrência de lacunas e períodos de dados nulos. Diante disto, neste trabalho serão utilizados os dados de reanálise ERA5, validado em estudos prévios, nomeadamente Yahaya et al. (2025) e Olauson (2018).

Face à necessidade da definição de uma região de estudo, este trabalho tem como foco o Porto de Sines, Portugal, uma localidade estratégica tanto pela sua relevância portuária quanto pelo potencial energético identificado em estudos anteriores (Anastas et al., 2022). E, tendo em vista que há estudos para implementação do WEC REEFS (*Renewable Electric Energy From Sea*) na região, o presente trabalho buscará definir os critérios de O&M considerando os limites de operacionalidade do equipamento, que se caracteriza como um dispositivo *nearshore* e está sendo desenvolvido na Universidade de Coimbra. O projeto resulta do trabalho do Laboratório de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da FCTUC e encontra-se já protegido por patente internacional (n.º EP3078844) (De Almeida, 2017).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo analisar as janelas de manutenções disponíveis para operação de um WEC a ser instalado no Porto de Sines (Sines, Portugal), considerando os estados de mar da localidade.

1.2.2. Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, definiu-se um conjunto de objetivos específicos a realizar. Em particular, pretende-se:

- Utilizar dados de reanálise ERA5, previamente validados como substituição aos dados *in situ*;
- Definir estados de mar que viabilizam a O&M do WEC, tendo como referência os limites de funcionamento do equipamento;
- Identificar períodos críticos e favoráveis para a manutenção do WEC.

1.3. Justificativa

Estudos no âmbito da sustentabilidade têm grande relevância visando atender às necessidades climáticas, face à crescente demanda de recursos energéticos. Frente a isso, os estudos acerca da viabilidade de O&M de tecnologias de conversão de energias renováveis em energia elétrica, nomeadamente a energia proveniente das ondas do mar são relevantes e podem auxiliar no desenvolvimento desta fonte energética emergente.

Para tal, existe a necessidade de uma fonte de dados que confira fiabilidade para a determinação dos estados de mar da localidade na qual será implementado um WEC, tendo em vista que, frequentemente, boias *in situ* possuem uma série de dados temporais com lacunas, *i.e.*, em virtude de limitações técnicas, manutenção ou mesmo impossibilidade de instalação do sensor, dados reais, apesar de relevantes, nem sempre podem ser utilizados como dados primários para estudos de viabilidade técnica e operacional.

A partir dos dados de agitação marítima podem ser definidas a variabilidade do recurso e a sazonalidade do potencial energético, pelo que, conseqüentemente e como extrapolação, pode-se definir critérios de O&M baseados nos estados de mar da região, tendo como ponto de partida os limites de operacionalidade do conversor.

Considerando essa extrapolação, é possível criar estratégias para a execução de manutenções adequadas à criticidade do ambiente e definir procedimentos para as ações preditivas, preventivas e corretivas, visualizando a operação em pleno e o aumento da vida útil do WEC.

1.4. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos principais, estruturados de forma a conduzir o leitor desde o enquadramento inicial do estudo até às conclusões finais e às propostas para trabalhos futuros.

O primeiro capítulo corresponde à Introdução. Nele são apresentados o enquadramento geral do tema, a relevância científica e tecnológica do estudo e os objetivos que nortearam a investigação. Este capítulo também aborda a justificativa do trabalho, evidenciando a importância do desenvolvimento de soluções que contribuam para a viabilização da energia das ondas e para a otimização das atividades de operação e manutenção em ambientes marítimos.

O segundo capítulo é dedicado à Revisão Bibliográfica, no qual são reunidos os principais fundamentos teóricos relacionados ao tema em estudo. Nesse capítulo são abordados, em primeiro lugar, conceitos gerais sobre energias renováveis e a sua crescente relevância no contexto da transição energética global. Em seguida, o foco recai sobre os conversores de energia das ondas, apresentando-se os diferentes tipos de tecnologias, os princípios de funcionamento, os estágios de desenvolvimento e os desafios enfrentados para a sua implementação em larga escala. São discutidos, ainda, os aspetos críticos associados à operação e manutenção desses dispositivos, destacando a relevância da acessibilidade marítima para a viabilidade técnica e econômica dos projetos. Por fim, este capítulo introduz a caracterização da região geográfica considerada como área de estudo.

O terceiro capítulo, denominado Métodos e Aplicação, detalha as ferramentas, procedimentos e etapas metodológicas que sustentaram a análise. São descritas as bases de dados meteorológicas e de reanálise utilizadas, justificando a sua escolha e a pertinência da sua utilização no contexto do estudo. Nesse capítulo, definem-se os critérios de acessibilidade empregados, explicam-se os parâmetros selecionados e apresenta-se a metodologia de identificação das janelas de manutenção. Além disso, é descrito o estudo de caso realizado, com a caracterização da região prevista para a instalação do conversor de energia, destacando as suas particularidades oceanográficas e meteorológicas. Por fim, são discutidos os limites de operação do dispositivo analisado, os cenários considerados e as hipóteses que orientaram a modelagem.

O quarto capítulo corresponde aos Resultados e Discussão. Nele são expostos e interpretados os principais resultados obtidos a partir da aplicação dos métodos descritos no capítulo anterior. Primeiramente, são apresentados os resultados referentes à variabilidade anual da acessibilidade marítima, permitindo compreender a evolução histórica ao longo das oito décadas estudadas. Em seguida, discute-se a variabilidade mensal, que evidencia as diferenças de acessibilidade entre os meses do ano, bem como a variabilidade sazonal, que fornece uma visão agregada por estação. Por fim, o capítulo contempla a análise da variabilidade anual da inacessibilidade, oferecendo uma perspectiva complementar sobre os períodos de restrição e sobre os riscos associados às operações em mar aberto. Cada conjunto de resultados é acompanhado de uma discussão crítica, na qual são exploradas as suas implicações práticas, as limitações encontradas e as possíveis comparações com trabalhos anteriores disponíveis na literatura.

O quinto e último capítulo destina-se à Conclusão. Neste encerramento, são sintetizados os principais resultados do estudo, destacando-se as contribuições para o avanço do conhecimento no campo da acessibilidade marítima aplicada à operação e manutenção de conversores de energia das ondas. São discutidas também as implicações práticas para o planeamento de operações offshore, bem como as oportunidades e desafios que permanecem em aberto. Finalmente, este capítulo apresenta recomendações para investigações futuras, sugerindo possíveis linhas de continuidade que possam expandir e aprofundar os resultados aqui obtidos.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Energias renováveis e o papel da energia das ondas

As energias renováveis têm se consolidado como uma alternativa fundamental para a diversificação da matriz energética e, conseqüentemente, como um factor importante para a diminuição da dependência energética de um País (Gayen et al., 2024). Nas últimas décadas, nomeadamente, frente à crescente discussão acerca do aquecimento global e do impacto dos GEE neste quesito, a busca por fontes de energia limpas e sustentáveis tornou-se objeto de estudo de diversas pesquisas. Isto abre espaço para que se desenvolvam tecnologias adequadas para o aproveitamento dos recursos naturais, pelo que, o amadurecimento da especialidade é consequência deste facto.

Do aproveitamento dos recursos naturais e suas tecnologias, aqueles relacionados à geração de energia eólica apresentam um nível de amadurecimento pleno, visto que os parques eólicos estão presentes globalmente. Além desta, a geração de energia solar também tem grande participação na matriz energética de Portugal e do Brasil, por exemplo, tendo se tornado um recurso difundido, inclusive, no âmbito residencial (Ferreira et al., 2023).

Tratando-se do aproveitamento energético de fontes marítimas, o potencial associado às ondas do mar tem capacidade de ser o maior contribuinte global em termos de energias limpas, com uma densidade de potência que excede consideravelmente a densidade das demais fontes renováveis (Yang et al., 2024). No entanto, apesar de abundante, a principal desvantagem acerca do aproveitamento do recurso energético proveniente do mar está relacionada aos custos de construção, instalação e manutenção, especialmente dos sistemas *offshore*, sejam eles de aproveitamento das ondas ou de aproveitamento do potencial energético diretamente dos ventos, como é o caso dos parques eólicos *offshore* (Astariz et al., 2015; Rönkkö et al., 2023).

2.2. Conversores de energia das ondas: tecnologias e classificações

Os WEC são dispositivos projetados para captar a energia mecânica associada às ondas do mar e convertê-la em energia elétrica (Beirão & Valério, 2015). Há diferentes tipos de equipamentos, com diferentes tecnologias e princípios de funcionamento (Farrok et al., 2020;

(Guo et al., 2022). De um modo geral, eles podem ser classificados em oito categorias (Tabela 1).

Tabela 1 – Tipos de WEC, seus princípios de funcionamento e suas características relevantes.

Tipo de Conversor	Princípio de Funcionamento	Características Relevantes
Conversor Articulado Alongado (Attenuator)	Dispositivo flutuante, constituído por braços articulados que oscilam com a passagem das ondas, captando a sua energia.	Instalado paralelo à direção da propagação das ondas.
Conversor Linear de Absorção Pontual (Point Absorber)	Estrutura flutuante que absorve energia proveniente de ondas oriundas de diferentes direções.	Movimento essencialmente vertical na superfície da água.
Conversor Articulado de Translação (OWSC)	Sistema submerso, de funcionamento semelhante a um pêndulo, cujo movimento é impulsionado pela oscilação das ondas.	Conversão energética baseada em movimentos oscilatórios.
Conversor de Coluna de Água Oscilante (OWC)	Estrutura oca parcialmente submersa; o movimento das ondas provoca a subida e descida da coluna de água, comprimindo e descomprimindo o ar.	O ar em movimento aciona uma turbina unidirecional ou bidirecional.
Conversor por Galgamento (Overtopping/Terminator Device)	As ondas são captadas e conduzidas para um reservatório; a água retorna ao mar através de turbinas.	Conversão baseada em queda hidráulica.
Dispositivo Submerso de Diferença de Pressão	Variações de pressão, induzidas pelo movimento das ondas, acionam o sistema de geração.	Instalação submersa.
Dispositivo Anaconda (Bulge Wave)	Tubo flexível preenchido com água; a incidência das ondas gera protuberâncias que se propagam ao longo do tubo, conduzindo água até à turbina.	Estrutura flutuante, ancorada ao fundo marinho.
Dispositivo de Massa Rotativa (Rotating Mass)	A oscilação das ondas gera o movimento de rotação de uma massa (peso excêntrico ou giroscópio) acoplada a um gerador.	Conversão baseada em momento de rotação.

Complementarmente, a Figura 2 ilustra os diferentes tipos de conversores de energia das ondas.

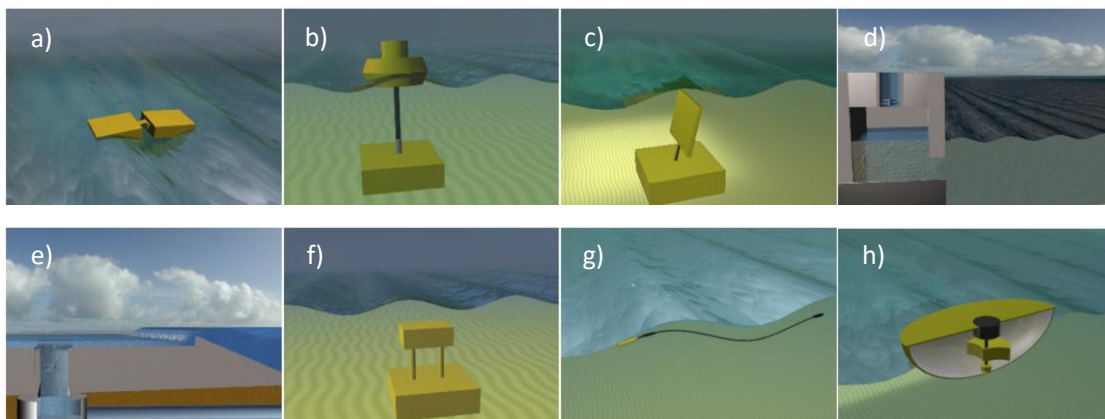


Figura 2 – Dispositivos conversores de energia das ondas: a) Attenuator; b) Point Absorber; c) OWSC; d) OWSC; e) Overtopping/Terminator Device; f) Submerged Pressure Differential; g) Bulge Wave; h) Rotating Mass (Aqua-RET Project, 2012).

Ainda, a respeito da classificação dos WEC, a profundidade de instalação traz à vista os termos *onshore* (costeiro), *nearshore* (perto da costa) e *offshore* (ao largo) (Figura 3) (Gang et al., 2022).

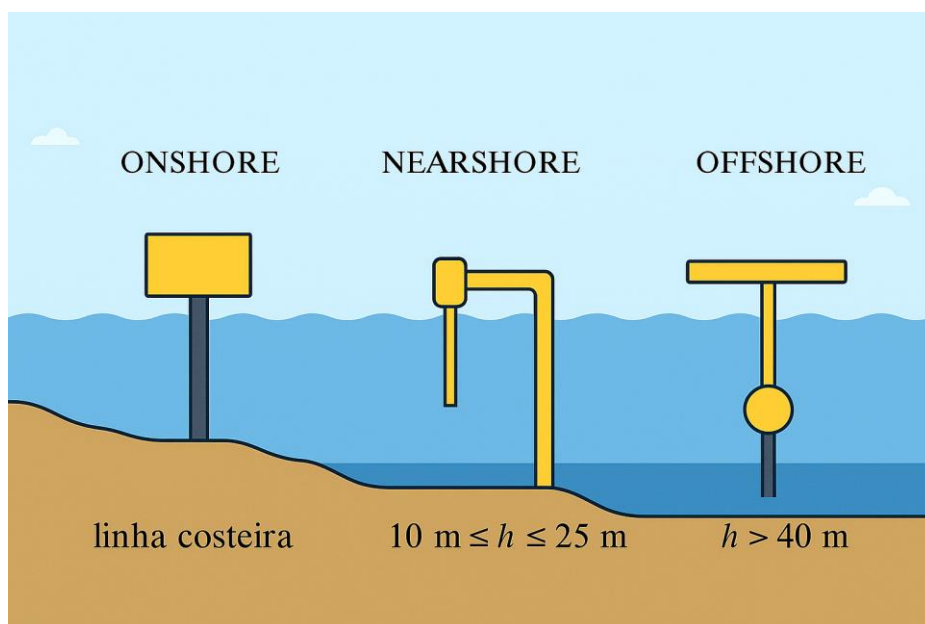


Figura 3 – Classificação dos WEC relacionada a sua respetiva profundidade de instalação.

2.3. Os desafios da O&M

Os WEC instalados em regiões ao largo, *i.e.*, classificados como *offshore*, apresentam o maior potencial de aproveitamento do recurso energético. Já os dispositivos instalados em áreas *nearshore* e *onshore* tendem a ter um aproveitamento inferior, uma vez que a energia associada às ondas sofre dissipação à medida que interage com o leito oceânico, ou seja, a aproximação

à costa está diretamente ligada à densidade energética do recurso. (Giannini et al., 2020). Estudos mostram que dispositivos offshore podem produzir até 40% mais energia anual em comparação com versões fixas ou instaladas mais próximas à costa, aproveitando melhor o recurso energético disponível (Bozzi et al., 2018; Shadmani et al., 2022).

Ainda assim, a implementação de dispositivos *nearshore* e *onshore* apresenta vantagens. Entre eles, destacam-se as condições marítimas mais amenas nessas regiões quando comparadas ao largo, além da maior facilidade frente aos processos de instalação e manutenção do equipamento (Jacobsen et al., 2016). Nestas condições, *e.g.*, não há necessidade de ancoragens como em águas profundas, tampouco nem de complexas infraestruturas para transportar a energia até a costa, o que contribui para a diminuição dos custos de transmissão elétrica (Giannini et al., 2024).

Entre os principais desafios associados à implementação dos WEC, encontram-se (Waters, 2008):

- a elevada exposição a carregamentos hidrodinâmicos extremos;
- os processos de corrosão e fadiga a que as estruturas estão continuamente sujeitas;
- as limitações operacionais relacionadas ao acesso para a realização de manutenção;
- a obtenção de dados de monitoramento;
- e a transmissão de energia elétrica até a costa.

Do ponto de vista mecânico, os desafios envolvem a integridade estrutural e, por consequência, o desempenho operacional. A exposição a forças hidrodinâmicas, *e.g.*, gera sobrecargas que exigem dimensionamento considerando fator de segurança e, quando necessário, uma análise detalhada das falhas (Yang et al., 2020). A corrosão, por sua vez, é intensificada pelo ambiente marítimo e compromete a durabilidade dos materiais, demandando projetos que considerem a aplicação de revestimentos, a utilização de materiais – ou ligas – mais resistentes ou, então, a adoção de outras estratégias de proteção, como a catódica. Já a fadiga estrutural decorre do carregamento cíclico imposto pelas ondas, pelo que é imposta a necessidade de estudos de vida útil, monitoramento de tensões e adoção de critérios de projeto baseados em resistência à fadiga (Jalón et al., 2023).

O custo de operação e manutenção (O&M) pode representar até 30–50% do custo total do ciclo de vida de um WEC, dependendo do tipo de dispositivo, local de instalação e frequência de falhas. Esses custos são elevados devido à necessidade de reparos frequentes, perdas de produção durante paradas e desafios logísticos em ambientes marítimos (Gray et al., 2017). A dificuldade de acesso ao mar, especialmente durante o inverno, reduz as janelas de manutenção e aumenta o tempo de inatividade dos dispositivos. A limitação de acesso para manutenções torna essencial a alta fiabilidade mecânica dos equipamentos e a adoção de estratégias de manutenção preditiva, como monitoramento de condição e controle tolerante a falhas, para minimizar intervenções emergenciais e maximizar a disponibilidade do sistema (Pradhan et al., 2018).

Por fim, a coleta de dados e a transmissão de energia para a costa dependem de componentes auxiliares que também devem atender a requisitos de resistência mecânica e fiabilidade em ambiente adverso (Johannesson et al., 2022).

Com isso, o estudo das janelas de manutenção para WEC faz-se necessário para auxiliar na definição de estratégias de O&M que coloque em concordância a fiabilidade do sistema conversor, o pleno aproveitamento do recurso energético e que possibilite a redução de custos.

2.4. Portugal: estudo de caso

O dispositivo REEFS (*Renewable Electric Energy From Sea*) representa um conceito inovador de WEC, concebido para funcionar como um recife artificial submerso, integrando objetivos de aproveitamento energético e proteção costeira. Desenvolvido pelo Laboratório de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Universidade de Coimbra, o sistema adota uma estrutura fixa e modular, instalada no fundo marinho costeiro. O princípio de funcionamento assenta numa envolvente de porosidade controlada, que induz fluxos internos capazes de acionar turbinas de baixo desnível, produzindo energia elétrica a partir do movimento das ondas, *i.e.*, o fluxo criado entre a crista e a cava das ondas aciona a turbina. (De Almeida, 2017). A Figura 4 apresenta esquematicamente o princípio de funcionamento do sistema e a representação gráfica do dispositivo.

Ensaio laboratoriais em modelo físico à escala reduzida demonstraram a viabilidade do conceito, confirmando a sua capacidade de dissipar parte da energia incidente e, simultaneamente, gerar potência elétrica em diferentes condições de mar simuladas. A resposta positiva do REEFS em cenários de maior agitação marítima forneceu contributos relevantes para a definição de critérios de acessibilidade, uma vez que a proximidade à costa e a simplicidade construtiva reduzem significativamente os constrangimentos logísticos e os custos de operação e manutenção típicos de dispositivos offshore (de Almeida & Martinho, 2020).

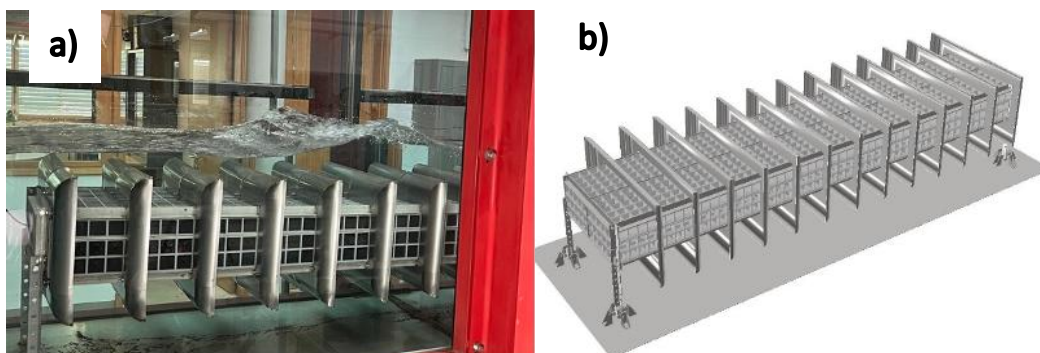


Figura 4 – Dispositivo *Renewable Electric Energy From Sea* (REEFS) e, respetivamente: a) seu princípio de funcionamento; e b) sua representação gráfica (De Almeida, 2017).

2.5. Critérios de acesso por condições de mar

O planeamento de operações *offshore* e *nearshore* depende diretamente da caracterização das janelas de manutenção, que são definidas com base em critérios de acessibilidade relacionados às condições marítimas. Segundo o estudo realizado por Ren et al., (2021), observa-se que a altura significativa da onda, o período energético e a direção do vento são parâmetros determinantes para a segurança e viabilidade de operações de embarque e desembarque, assim como para o desempenho de equipamentos e embarcações.

A literatura aponta diferentes abordagens para a definição desses critérios, variando desde limites conservadores, que priorizam a segurança em condições marítimas moderadas, até critérios mais permissivos, que ampliam as oportunidades de acesso em condições de mar agitado. Essa flexibilização, embora aumente a janela de operação, frequentemente requer o uso de embarcações e equipamentos mais robustos, capazes de operar em estados de mar adversos, refletindo em custos operacionais e logísticos mais elevados (Paterson et al., 2018).

Por fim, a integração de dados meteorológicos e de maré, juntamente com análises estatísticas de séries temporais de ondas e vento, permite a construção de modelos preditivos para otimizar o planeamento de manutenção e reduzir riscos operacionais. A adoção de tais modelos contribui para uma maior eficiência na programação de operações, equilibrando a segurança das equipes e equipamentos com os custos de operação (Gintautas & Sørensen, 2017).

3. Métodos e Aplicação

3.1. Dados meteorológicos

No que tange aos dados meteorológicos estes cumprem um papel essencial para o processo de elaboração de um plano de O&M, por conseguinte possibilitam realizar a avaliação das janelas meteorológicas, especificamente para este trabalho, podem ser denominadas janelas de manutenção, *i.e.*, os períodos em que há condições de acesso aos WEC. As condições de acesso em sua maioria são definidas de acordo com as limitações da embarcação empregada e também com base na experiência do operador do equipamento (De Andrés et al., 2015). Somando a isso as tarefas de O&M em WEC devem ser planeadas para os períodos do ano onde há máxima acessibilidade e menor potencial energético, *i.e.*, a receita gerada é menor e, por conseguinte, o custo de O&M. Todavia, em certos casos isto não é possível, frente a necessidade iminente de manutenção corretiva (Mortazavizadeh et al., 2023).

3.2. Dados de reanálise

Os modelos de reanálise correspondem a produtos numéricos que combinam dados observacionais — provenientes de satélites e medições *in situ* — com modelos de previsão atmosférica e oceânica. Dessa forma consegue gerar séries temporais consistentes de longa duração de variáveis climáticas e oceanográficas, possibilitando a reconstrução do estado passado da atmosfera e do oceano com elevada coerência espacial e temporal (Moore et al., 2024). A utilização de dados de boias *in situ* muitas vezes não se torna viável em virtude de lacunas por limitações do equipamento, falhas nas medições, manutenções e curto espaço de amostragem se comparados aos modelos de reanálise.

Dentre as bases de reanálise disponíveis com informação sobre agitação marítima, destaca-se o ERA5, desenvolvido pelo *Copernicus Climate Change Service* (C3S) no âmbito do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Este modelo de quinta geração fornece dados desde 1940 até ao presente, com resolução temporal horária e resolução espacial de 0,25° para a atmosfera e 0,50° para parâmetros de ondas. Para além da sua abrangência temporal, estudos prévios demonstraram a boa concordância entre os resultados do ERA5 e medições de boia na região em estudo que, neste caso, trata-se da região do Porto de Sines (Dos Santos, 2023), reforçando a sua adequação para o presente trabalho (Silva et al., 2022).

3.3. Limites de acessibilidade para O&M

As operações marítimas em dispositivos de conversão de energia das ondas possuem condicionantes criteriosos e rigorosos de acessibilidade, tendo em vista a garantia da segurança da operação bem como a integridade estrutural dos equipamentos envolvidos.

Tratando-se dos critérios de acessibilidade, estes são estabelecidos em função da altura significativa da onda (H_s) e do período de pico (T_p), parâmetros que limitam de forma decisiva a realização das operações marítimas. Em suma, adota-se uma faixa operacional entre 1,5 m e 3,5 m de H_s , variando em função de T_p . Sobretudo, a velocidade do vento se torna fator determinante ao ultrapassar 20 nós (unidade de velocidade utilizada no contexto náutico, *i.e.*, cerca de 37 km/h), desaconselhando as operações (Gray et al., 2017).

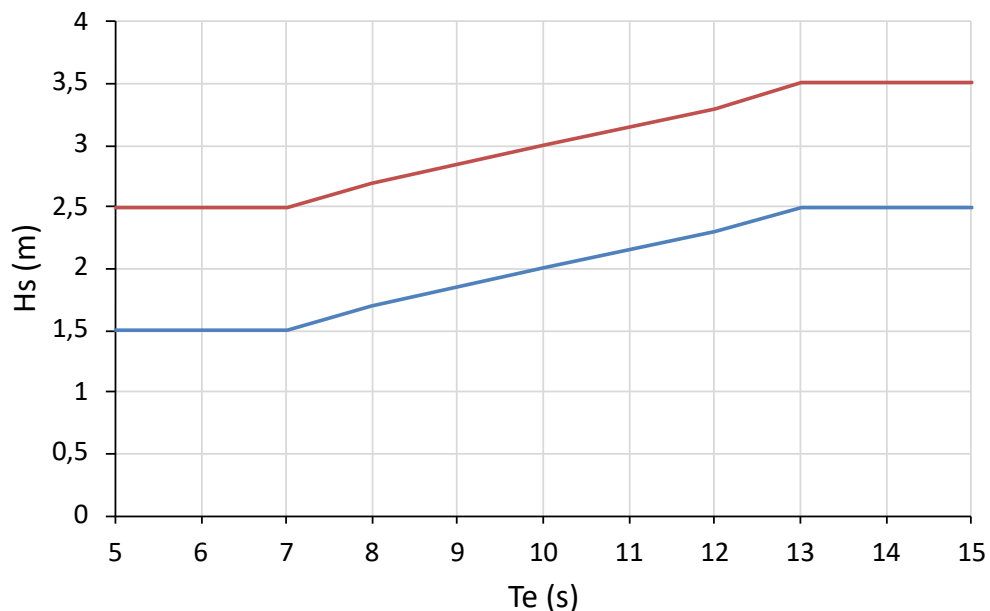


Figura 5 – Limites de acessibilidade para O&M (Adaptado de Gray et al., 2015).

A relação entre H_s e T_e , representada graficamente na Figura 5, é proveniente da experiência adquirida em operações de campo com sistemas como o Pelamis (Gray et al., 2015). Esta evidência empírica viabiliza uma ferramenta com base prática para o planeamento e definição de janelas de manutenção, permitindo antecipar condições favoráveis e assegurar maior fiabilidade nas etapas de O&M de WEC. Ainda, em relação à Figura 5, a linha vermelha refere-se aos critérios de acessibilidade para operação de remoção do WEC; e a linha azul, por sua vez, refere-se aos critérios de acessibilidade para operação de instalação do sistema.

Importa salientar que o parâmetro T_e corresponde ao período de energia da onda. No entanto, este valor é raramente determinado com rigor, podendo as suas incertezas ser avaliadas a partir

da forma do espectro de onda, α , descrita em modelos espectrais paramétricos (como, por exemplo, os espectros de Pierson-Moskowitz e JONSWAP) (Ahn, 2021; Ribeiro et al., 2020).

Considerando o espectro Pierson-Moskowitz, o parâmetro α pode variar de 0.86 a 1. O aumento em direção à unidade está associado com a diminuição da largura espectral (Ahn e Neary, 2020; Cornett, 2008; Pastor e Liu, 2016). Neste trabalho, tratando-se de uma fase preliminar de projeto ou estudos de viabilidade de indicadores de operação de WEC, considerou-se suficiente usar T_p como proxy de T_e ($T_p=T_e$) para simplificar cálculos.

Com base na metodologia apresentada em estudos anteriores (Moore et al., 2024) e na Figura 6, neste estudo serão utilizados critérios de acessibilidade em função conjunta de H_s e T_p . Para este trabalho, adotou-se o critério conservador, representado pela linha inferior azul, que define a faixa de acessibilidade como uma função de T_p . Assim, para $6 \leq T_p \leq 7s$, a condição operacional é $H_s \leq 1,5m$, aumentando até $H_s \leq 2,5m$ para $13 \leq T_p \leq 15s$. Adicionalmente, foram implementados três novos cenários de acessibilidade, apresentados na Figura 6. No cenário 1, a condição operacional varia de $H_s \leq 2,0 m$, para $6 \leq T_p \leq 7 s$, até $H_s \leq 3,0 m$, para $13 \leq T_p \leq 15 s$. No cenário 2, o limite de operação inicia em $H_s \leq 1,0 m$, evoluindo até $H_s \leq 2,0 m$ no mesmo intervalo de período de pico. Já no cenário 3, o critério considerado é mais restritivo, partindo de $H_s \leq 0,5 m$ e aumentando até $H_s \leq 1,5 m$.

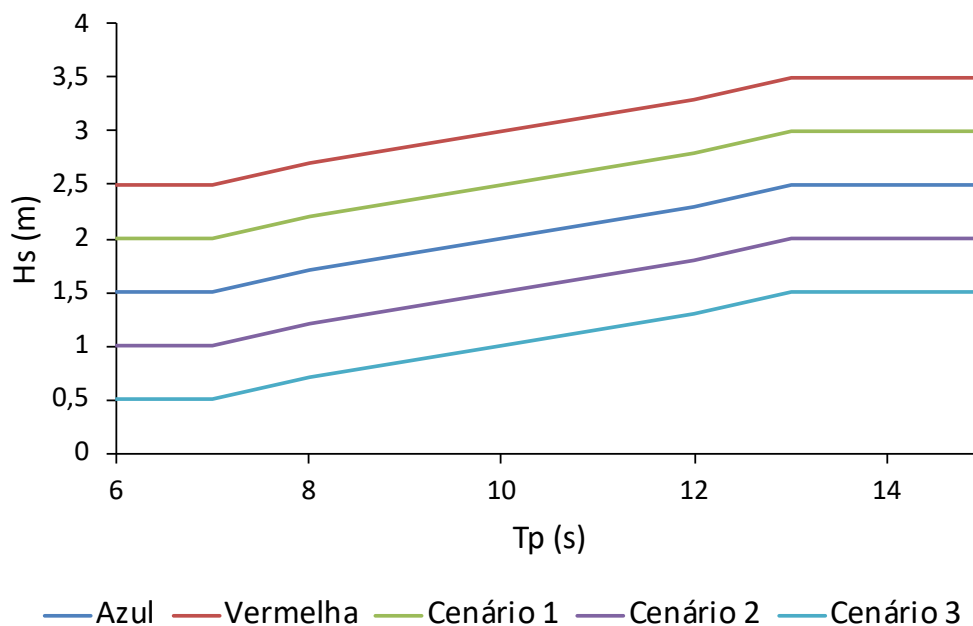


Figura 6 – Novos limites de acessibilidade para O&M.

A abordagem definida pela linha superior vermelha, representada na Figura 5, adota um critério de acessibilidade mais permissivo, ampliando os limites para a caracterização das janelas de manutenção. Dessa forma, mesmo em condições de maior agitação marítima, é possível realizar operações de acesso. No entanto, estados de mar mais severos exigem o uso de embarcações e meios técnicos mais robustos, capazes de operar em condições adversas, o que impacta

diretamente nos custos de (O&M). Nesse contexto, a definição desses critérios torna-se fundamental para assegurar a continuidade operacional, ao mesmo tempo em que busca minimizar riscos e otimizar recursos disponíveis.

3.4. Aplicação ao caso de estudo

Tendo como base o estudo realizado por Dos Santos (2023) e os dados de agitação marítima retirados do ERA5, foram identificados os estados de mar com parâmetros de agitação mais amenos, *i.e.*, os períodos do ano que, historicamente, assumem valores de Hs e Tp dentro dos critérios de acessibilidade adotados neste estudo.

Estudos realizados previamente sobre a acessibilidade e respectivas janelas de manutenção mostram que para uma operação segura são considerados intervalos de ao menos 12h contínuas dos estados de mar favoráveis para que se possa definir uma janela de manutenção (Gallagher et al., 2013; O'Connor et al., 2012).

Tecnologias como Pelamis, AquaBuOY, Wave Dragon e OWC têm sido analisadas ou testadas na costa portuguesa, acompanhadas por um interesse crescente na integração entre aproveitamento da energia das ondas e sustentabilidade (Clemente et al., 2023; Onea et al., 2021; Castro-Santos et al., 2018).

3.4.1. Porto de Sines (Sines, Portugal)

Uma série temporal de dados de reanálise provenientes do ERA5 dos anos de 1940 até 2020 é utilizada para a avaliação dos estados de mar da região do Porto de Sines (Sines, Portugal) contendo as informações de altura significativa de onda (Hs) e período de pico (Tp). A região do Porto de Sines foi selecionada como área de aplicação devido ao interesse associado à futura implementação do conversor REEFS no âmbito do projeto NEXUS (Digital Green Logistics), financiado pelo Plano de Recuperação e Resiliência português (PRR), 2022-2025 (<https://nexuslab.pt>). O ponto de extração situa-se em coordenadas próximas à área costeira de Sines conforme é apresentado na

Tabela 2 e na Figura 7.

Tabela 2 – Coordenadas e profundidades dos pontos ERA5 considerados.

Referência	Latitude/Longitude	Profundidade (m)
Porto de Sines	38.00°N/-09.00°W	200

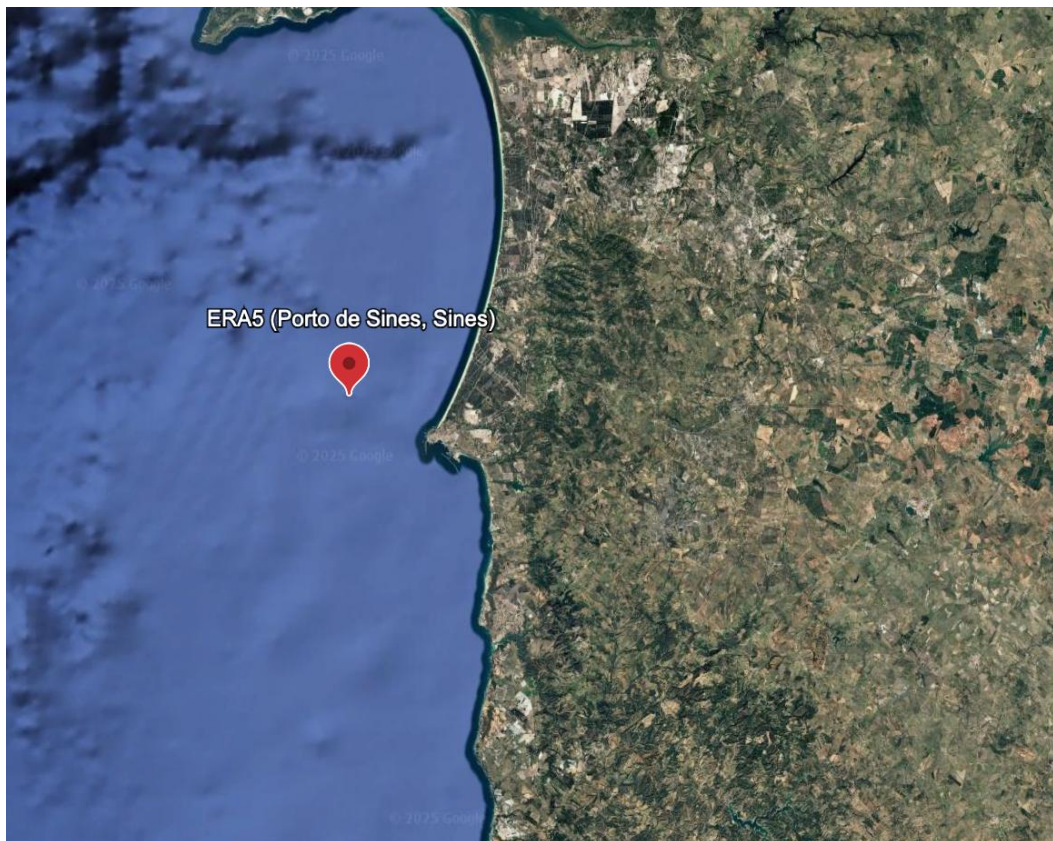


Figura 7 – Ponto de estudo (ilustração realizada através da ferramenta Google Earth (<https://earth.google.com/>)).

Para garantir uma série estatisticamente robusta, foram considerados 81 anos de registos, resultando em 236.688 entradas individuais por variável, com medições a cada três horas. Esta base de dados constitui a principal referência para a avaliação da adequação do REEFS às condições marítimas locais. Além de fornecer uma visão abrangente sobre os estados de mar ao longo de oito décadas, o conjunto de dados permite avaliar as condições de acessibilidade para instalação e manutenção do sistema, aspetos determinantes para a viabilidade de um dispositivo *nearshore*.

Para caracterizar as condições marítimas e avaliar a viabilidade operacional do conversor REEFS, os dados de reanálise foram utilizados para:

- Determinar as janelas operacionais seguras para instalação e manutenção do dispositivo, considerando altura significativa das ondas (Hs), período de pico (Tp);
- Analisar a variabilidade anual das condições de mar, identificando períodos do ano mais favoráveis para operações;
- Avaliar a variabilidade sazonal e mensal, permitindo uma previsão mais detalhada de acessibilidade ao longo do tempo;

- Fornecer uma perspectiva operacional, destacando possíveis limitações e impactos logísticos na implementação e manutenção do REEFS.

Assim, o estudo de caso do Porto de Sines estabelece a base para a aplicação da metodologia proposta, permitindo explorar a utilização de longas séries temporais de dados de reanálise para a avaliação da viabilidade operacional do conversor REEFS. Este enquadramento constitui a referência para o capítulo seguinte, onde são apresentados e discutidos os resultados da análise em diferentes escalas temporais.

3.4.2. O&M do WEC REEFS

Os WEC são projetados para operar dentro de faixas específicas de altura significativa de onda (H_s) e período de pico (T_p), de forma a garantir a eficiência de captura de energia e a integridade estrutural do equipamento. A coerência entre os estados de mar e o WEC é fundamental: ondas muito pequenas não permitem extração energética relevante, enquanto estados de mar demasiadamente agitados podem comprometer a segurança e a durabilidade dos componentes (Gonzalez et al., 2023). Por isso, cada WEC possui limites operacionais pré-estabelecidos, que orientam não só a operação contínua, mas também os procedimentos de O&M.

No caso do REEFS, a faixa operacional está definida entre $1,50 \text{ m} \leq H_s \leq 5,00 \text{ m}$ e $6,00 \text{ s} \leq T_p \leq 12,00 \text{ s}$, sendo que valores fora desse intervalo reduzem a viabilidade energética ou aumentam o risco operacional (Dos Santos, 2023). Estudos com outros WEC mostram faixas semelhantes, com operação ideal geralmente entre 2 e 3 m de H_s e 5,6 a 9,2 s de T_p em escala real, reforçando a importância de alinhar o projeto do dispositivo às características do regime de ondas local (Ahmed et al., 2023).

4. Resultados e Discussão

4.1. Validação de dados ERA5

A validação dos dados de reanálise ERA5 foi efetuada a partir de dados existentes *in situ* de uma boia localizada na região do Porto de Sines. Dessa forma foram considerados 42.921 dados no período de janeiro de 2017 a outubro de 2022. Os dados de boia para Hs, Tm e θ_m são relacionados com os respetivos pares dos dados ERA5, apresentando a correlação entre estes. A Figura 8 ilustra na forma de uma dispersão com barra de cores as maiores ocorrências e a distribuição dos dados (Dos Santos, 2023).

A referida validação dos dados do ERA5 foi realizada empregando diferentes métricas de avaliação, incluindo:

- o coeficiente de determinação, R^2 , tem por finalidade avaliar a qualidade do ajuste de um modelo de regressão, plotando a percentagem da variação nos dados que é explicada pelo modelo, se calcula utilizando a Equação (1),

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) - (x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \right)^2 \quad (1)$$

onde x e y representam os valores reais (medições por boias) e os valores modelados (dados de reanálise ERA5) dos parâmetros estudados, respetivamente, a barra superior denota média, e n representa o número de pares de dados.

- $RMSE$, raiz dos erros quadráticos médios, tem por finalidade medir a raiz quadrada dos erros quadráticos entre os valores previstos e os valores reais, permitindo avaliar a escala média dos erros que o modelo faz, é calculada utilizando a Equação (2),

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (2)$$

- as percentagens dos desvios sistemáticos entre os valores previstos e os valores reais, através do *bias*, ψ , que possui por finalidade medir a tendência global do modelo de subestimar ou superestimar os valores reais, utilizando a Equação (3),

$$\psi = 100 \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{y_i} - 1 \right)}{n} \quad (3)$$

- o módulo do *bias*, $|\psi|$, que resulta numa medida do desvio médio absoluto entre os valores previstos e os valores reais, não a considerar a direção do desvio (sub- ou superestimar) é utilizada a Equação (4),

$$|\psi| = 100 \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i}{y_i} - 1 \right|}{n} \quad (4)$$

Adicionalmente, foi ainda calculado o desvio padrão, σ , que indica o grau de dispersão de um conjunto de dados, associado aos valores médios dos dados das boias e dos dados do ERA5, respetivamente, utilizando as Equações (5)–(6),

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (5)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n}} \quad (6)$$

A partir da Figura 8 é possível observar que há uma forte correlação para os parâmetros de Hs e Tm, pois o valor do coeficiente de correlação (R^2) está muito próximo da unidade. Adicionalmente, se nota uma grande concentração de pontos em uma única região com baixa densidade fora deste núcleo. De outro modo, para os dados de direção de onda se observa uma quantidade maior de dados dispersos e mais espalhados, dessa forma o coeficiente de correlação para a direção de onda resulta em $R^2 = 0,12$, porém análises adicionais como *bias* e RMSE mostram uma concordância entre os dados de boia e o ERA5.

Resultados e Discussão

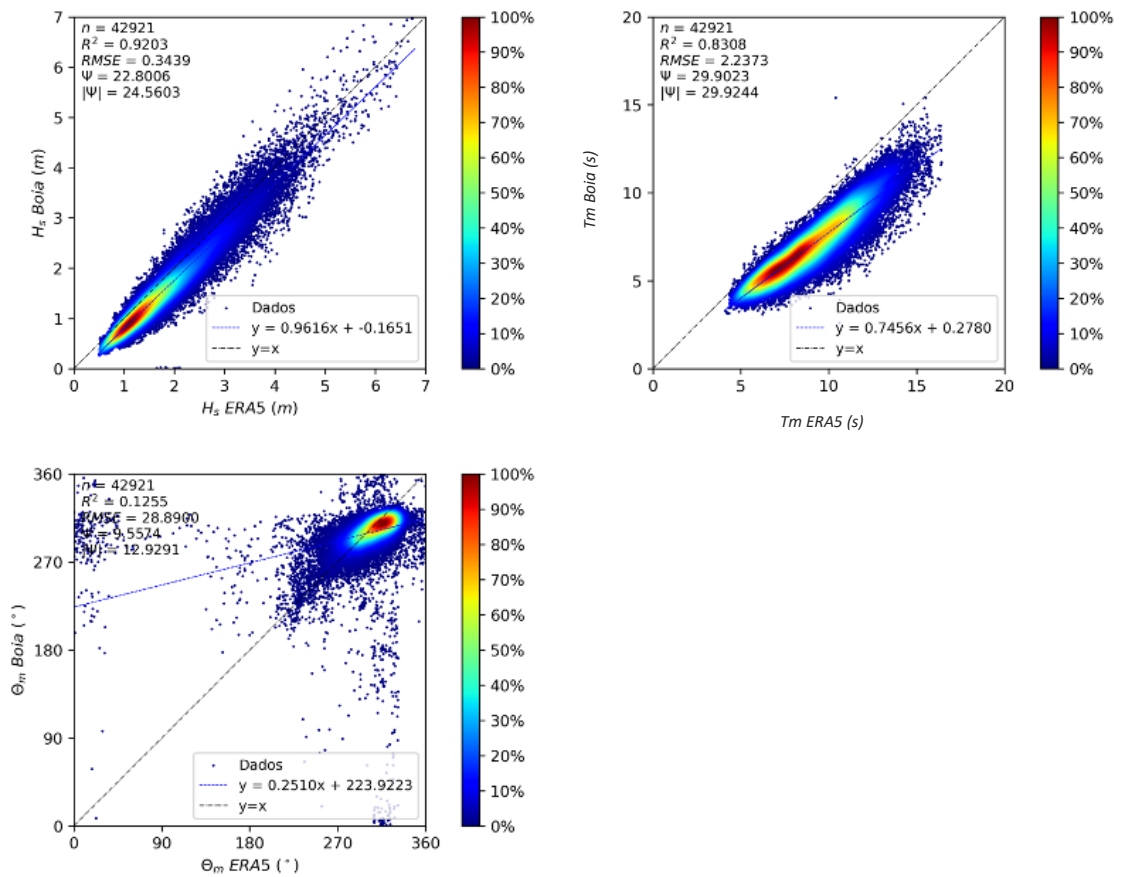


Figura 8 – Dados *in situ* com validação ERA5 (Dos Santos, 2023).

Adiciona-se, ainda, que para os próximos capítulos de caracterização da agitação marítima e demais análises quantitativas, foram empregados os seguintes recursos de avaliação:

- desvio padrão, σ (Equação 5);
- e a média, que é uma medida de tendência que representa um valor central em um conjunto de dados, obtida ao somar todos os valores do conjunto e dividir o resultado pelo número total de valores, utilizando a Equação (7),

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (7)$$

4.2. Caracterização da agitação marítima

A Figura 9 mostra a frequência de ocorrência de diferentes intervalos de valores de H_s e T_p obtidos a partir dos dados do ERA5, representativos de distintos estados de mar. A escala de cores, variando do verde ao vermelho, indica a intensidade das ocorrências observadas na série

histórica para o Porto de Sines, Portugal, do menor para o maior valor, respetivamente. Os resultados evidenciam que os períodos de pico variam entre 3 e 21 s, enquanto as alturas significativas de onda se encontram no intervalo de 0,5 a 10,5 m. Destaca-se a região delimitada entre 8 e 13 s para T_p e de 1 a 2 m para H_s , que apresenta maior concentração de ocorrências, evidenciada pela coloração avermelhada. Além disso, observa-se uma tendência de redução na frequência de ocorrência à medida que os valores se aproximam dos limites superiores e inferiores previamente mencionados.

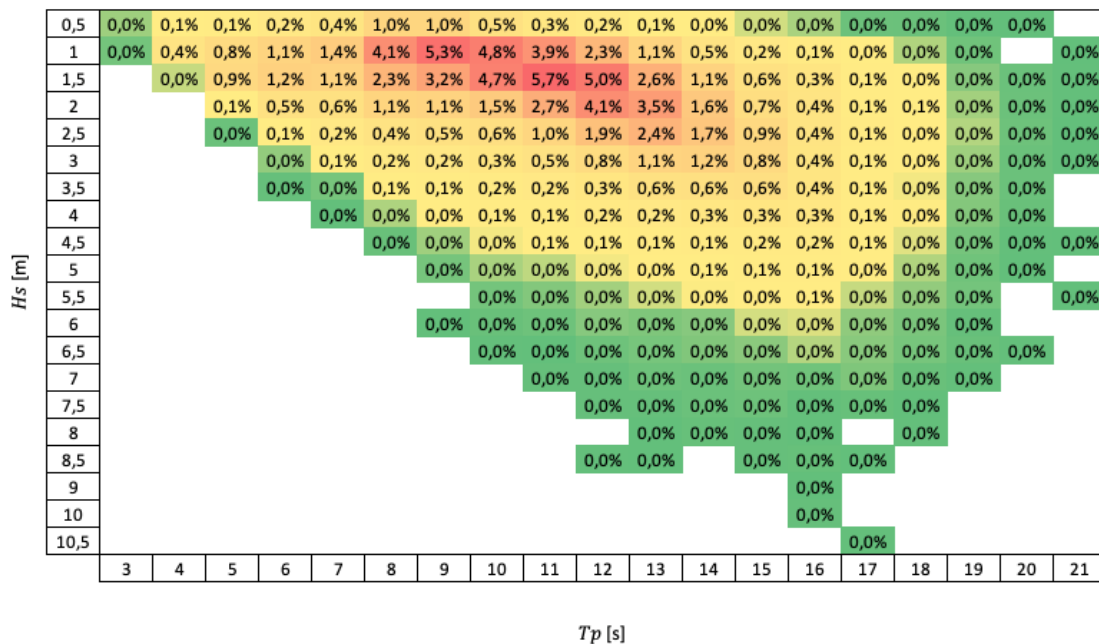


Figura 9 – Mapa de calor dos estados de mar.

A partir da caracterização da agitação marítima da localidade, pode-se analisar individualmente os parâmetros H_s , T_p e θ_m . Nas Figura 10 e Figura 11, respetivamente, são apresentados os percentuais de ocorrência de determinada condição de mar. Além disso, tem-se, na Figura 12, os percentuais de ocorrência do parâmetro de direção de onda ($^\circ$). Referente aos dados de altura significativa de onda se identifica uma concentração de aproximadamente 30% dos valores entre 1 e 2 m, ondas maiores do que 4 m tem uma ocorrência menor do que 5% ao longo de todo o período avaliado.

Resultados e Discussão

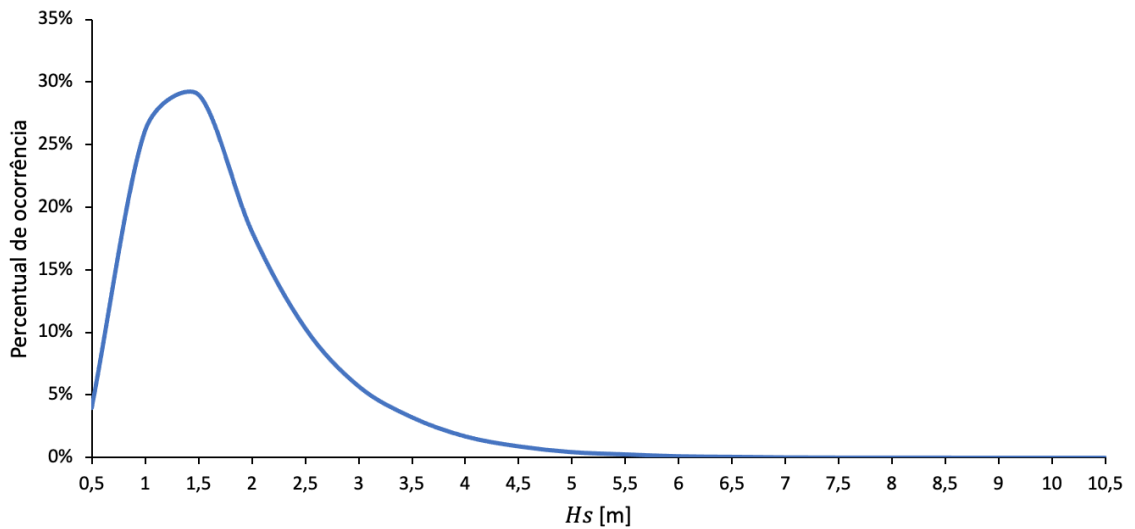


Figura 10 – Percentual de ocorrência de diferentes valores de Hs.

Ao considerar os valores de período de pico ao longo dos 81 anos de análise, se observa uma forte incidência entre 8 e 13 s, porém entre 11 e 13 s para T_p são encontradas ocorrência na ordem de 15%. Os dados podem ser visualizados na Figura 11.

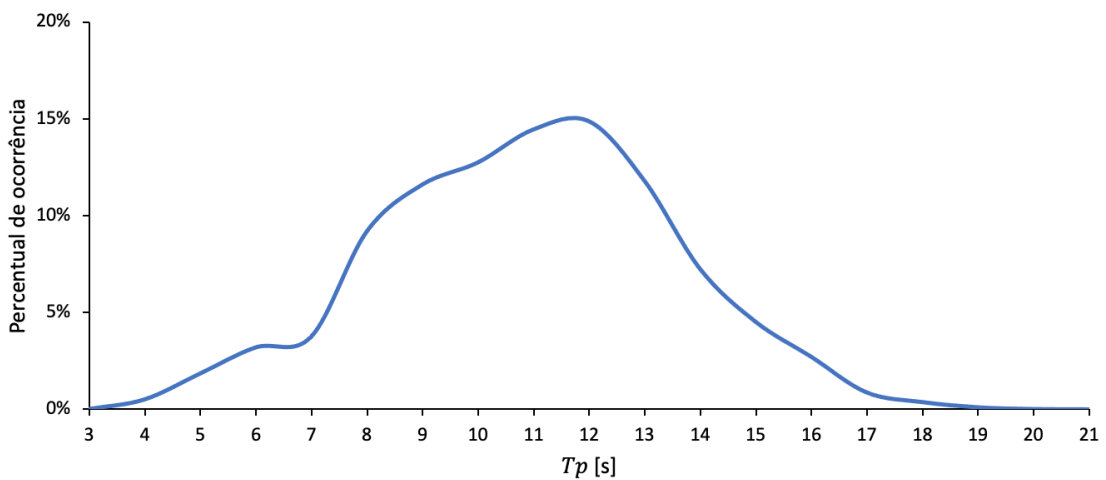


Figura 11 – Percentual de ocorrência de diferentes valores de T_p .

Para os objetivos deste estudo, os dados de direção de onda não foram considerados na avaliação das janelas de manutenção e de O&M. Contudo, mantêm elevada relevância no que diz respeito à navegabilidade até ao ponto de instalação do dispositivo. A Figura 12 evidencia uma forte concentração de direções de onda entre as classes 13 e 15, correspondentes a ondas provenientes de NW (entre 270° e $337,5^\circ$), que representam aproximadamente 45% dos estados de mar registrados.

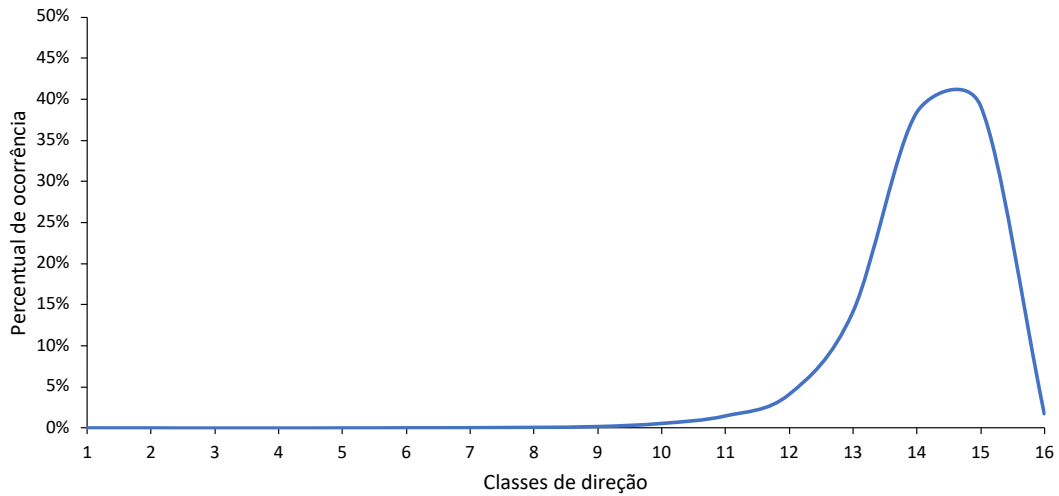


Figura 12 – Percentual de ocorrência de diferentes valores para diferentes classes de direção de propagação das ondas (cada classe corresponde a um intervalo de 22,5°).

4.3. Cenário 1 como critério de acessibilidade

4.3.1. Variabilidade Anual

O cenário 1 apresentado na Figura 6 é representado na Figura 13 em um mapa de calor das ocorrências dos valores de altura significativa (H_s) de onda e período de pico (T_p). Neste contexto a região delimitada com linhas tracejadas vermelhas caracteriza os estados de mar onde é possível realizar a O&M.

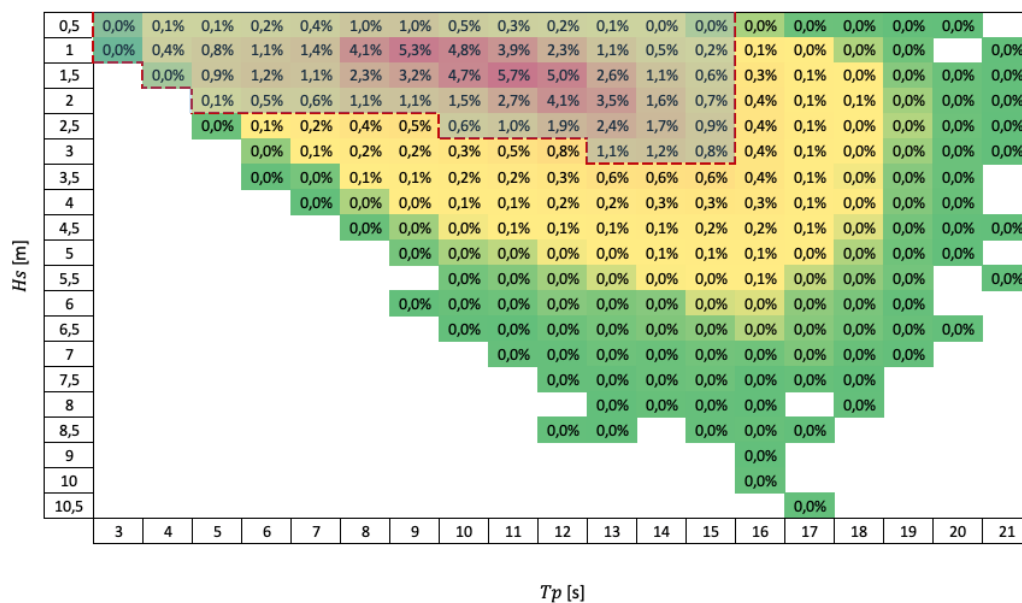


Figura 13 – Mapa de calor delimitado pelos critérios de acessibilidade.

Resultados e Discussão

O mapa de calor dos estados de mar da série histórica, apresentado na Figura 13, mostra que, de acordo com os critérios de acessibilidade definidos — *i.e.*, $6 \leq T_p \leq 7$ s para $H_s \leq 2$ m, aumentando até $H_s \leq 3$ m para $13 \leq T_p \leq 15$ s — o critério de acessibilidade em estudo apresenta uma elevada acessibilidade. Com efeito, verificou-se que, ao longo dos 81 anos analisados, 87,4% dos estados de mar se enquadram nos critérios estabelecidos.

No contexto da análise da variabilidade anual na região do Porto de Sines, a Figura 14 apresenta a média anual de dias acessíveis ao longo de um período de 81 anos (1940 a 2020). A média de dias acessíveis durante este período é de 317 dias por ano. Entretanto, ao longo dos anos, se verifica uma tendência de queda na quantidade de dias acessíveis. O número de dias acessíveis por ano varia entre um mínimo de 281,4, registado em 2014, e um máximo de 344,8, observado em 1945. Não obstante a tendência de redução média anual de dias acessíveis, a análise do desvio padrão, de 11,9 dias, indica uma variabilidade relativamente baixa, sugerindo uma boa previsibilidade da acessibilidade ao longo das oito décadas analisadas.

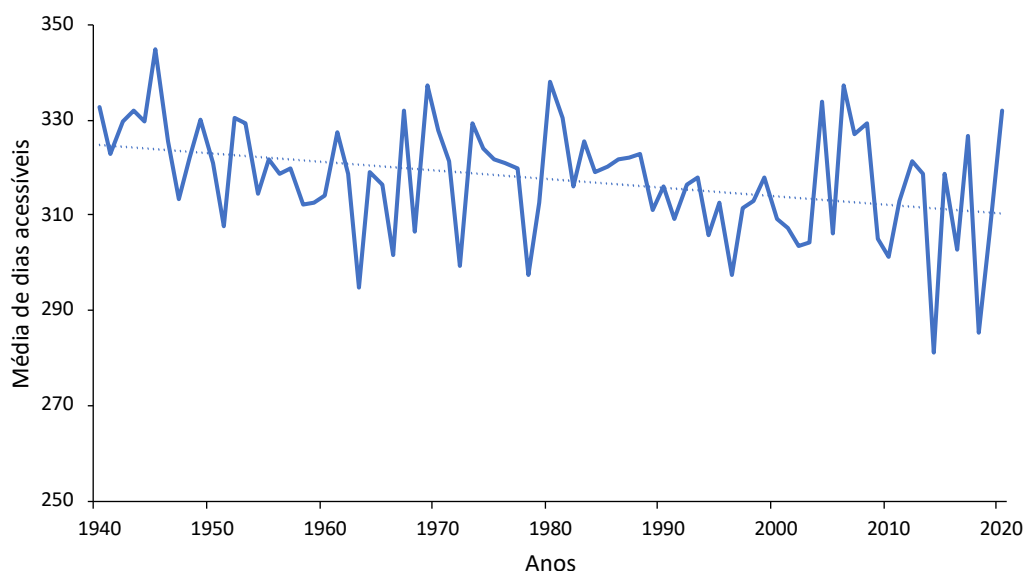


Figura 14 – Média anual de dias acessíveis.

A Figura 15 apresenta a quantidade de janelas de manutenção ao longo dos anos. Neste estudo, considerou-se como janela de manutenção as séries temporais com estados de mar favoráveis e duração igual ou superior a 12 horas. Verificou-se que, em 1941, ocorreram 27 janelas de manutenção, o menor valor da série temporal, enquanto em 2018 foram observadas 58 janelas. Para o período analisado, identificou-se uma média de 41,4 janelas de manutenção por ano, com um desvio padrão de aproximadamente 6,6. Assim, considerando o intervalo de 81 anos (1940–2020), observa-se uma tendência de aumento no número de janelas de manutenção.

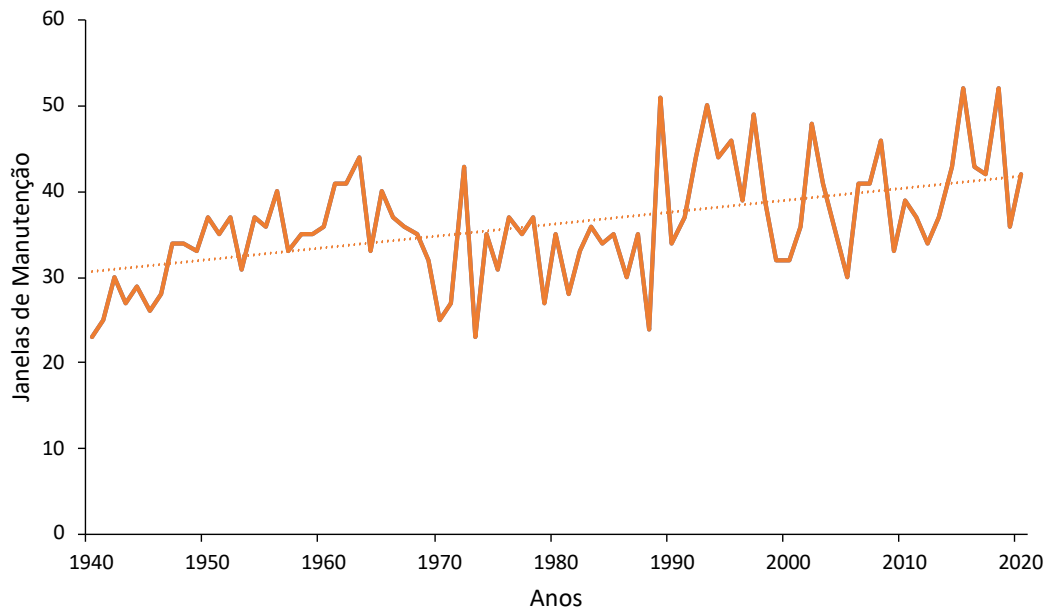


Figura 15 – Janelas anuais de manutenção.

A Figura 14 evidencia que a acessibilidade anual se manteve relativamente estável ao longo das oito décadas analisadas, com uma média elevada de dias disponíveis. Por sua vez, a Figura 15 mostra uma tendência de aumento no número de janelas de manutenção. Em conjunto, estes resultados indicam que, embora o total de dias acessíveis varie pouco, a forma como esses dias se distribuem ao longo do ano tem vindo a mudar, gerando um maior número de oportunidades, ainda que mais curtas, para a realização de operações.

4.3.2. Variabilidade mensal

Ao longo do ano é possível observar uma variação significativa no número de horas de acessibilidade em cada mês, conforme se ilustra na Figura 16. O mês de fevereiro, considerado aqui como a média de todos os fevereiro ao longo das oito décadas analisadas, apresenta o menor tempo de acessibilidade, com 495 h, o que corresponde a aproximadamente 21 dias. Nos meses seguintes verifica-se uma tendência de aumento do tempo médio de acessibilidade até julho, que atinge 737 h em média, equivalentes a cerca de 31 dias (*i.e.*, a totalidade do mês). A partir de agosto e até fevereiro, observa-se uma diminuição gradual do tempo médio acessível.

Resultados e Discussão

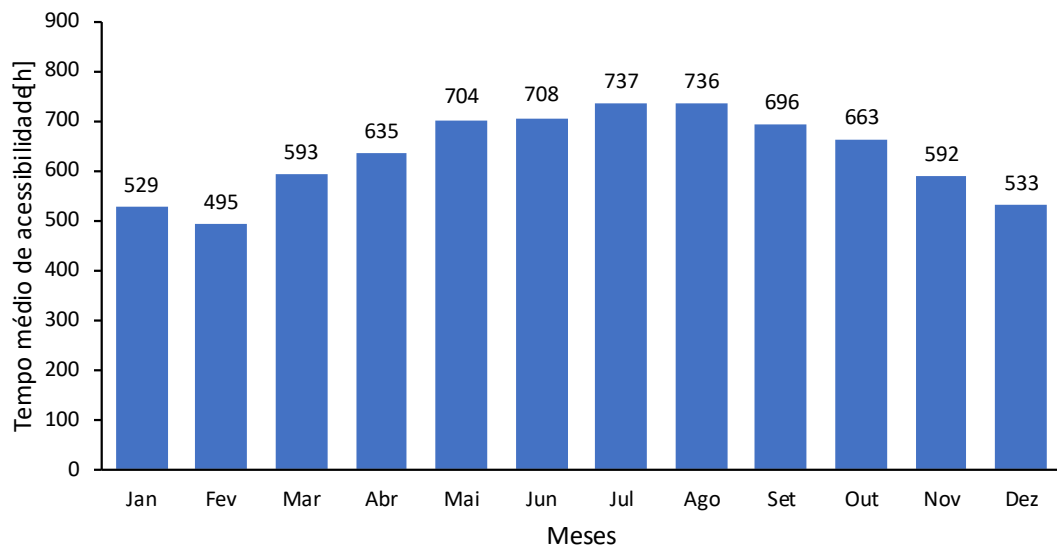


Figura 16 – Tempo médio mensal de acessibilidade.

Com base na Figura 17, que apresenta o tempo médio de acessibilidade ao longo dos meses através da linha central azul, é possível observar o comportamento da média em conjunto com a adição e subtração dos desvios padrão (linhas a tracejado). Nota-se que os meses de inverno apresentam maior variabilidade. Em especial, o mês de janeiro atinge o maior valor de desvio padrão com 119,4 h, seguido por fevereiro e março e após novembro e dezembro com desvios de 91,7 e 87,7 por fim 85,4 e 103,9 h. Por outro lado, os meses de verão registam valores muito baixos de dispersão, como junho com 15,4 h, julho com 15,3 h e agosto com 15,5 h, o que evidencia uma maior estabilidade das condições de acesso durante esse período. De forma geral, os meses compreendidos entre abril e outubro destacam-se por apresentarem melhores condições de acessibilidade, tanto pela maior disponibilidade média de horas como pela menor variabilidade entre anos.

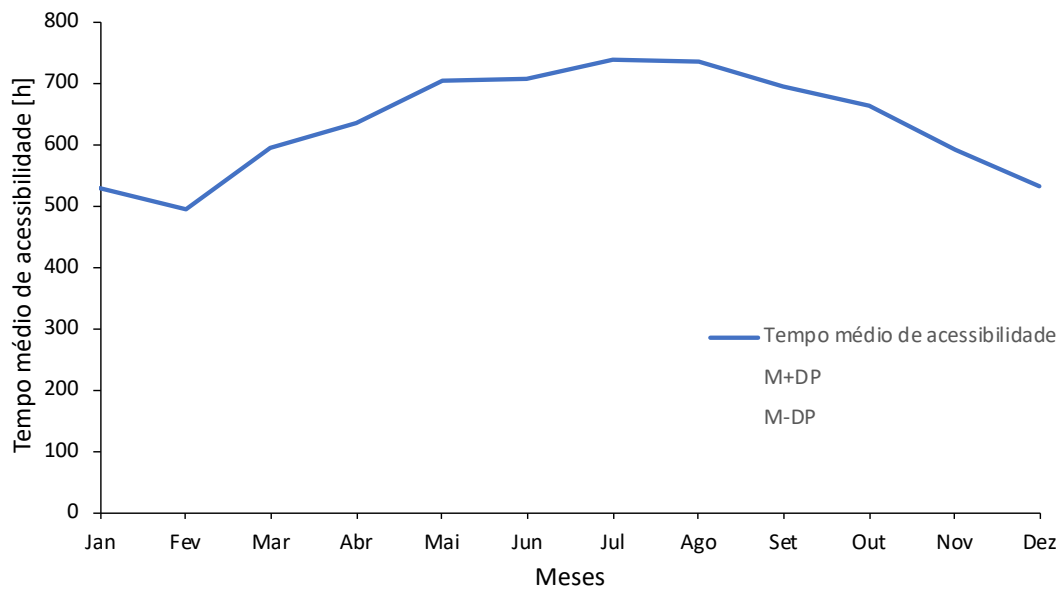


Figura 17 – Tempo médio e desvio padrão mensal de acessibilidade.

4.3.3. Variabilidade sazonal

Considerando a análise sazonal presente Figura 18, se verifica que o inverno apresenta o menor tempo médio de acessibilidade, com 519 h, refletindo a maior ocorrência de condições desfavoráveis ao longo desta estação. A primavera registra uma melhoria significativa, alcançando em média 644 h de acessibilidade, tendência que se intensifica no verão, apresentando o valor mais elevado com 727 h, correspondendo ao período mais favorável do ano referente à acessibilidade. Já no outono observa-se uma ligeira redução para 650 h, ainda assim mantendo valores superiores aos do inverno. Estes resultados evidenciam a forte influência da sazonalidade, com condições mais restritivas nos meses de inverno e maior disponibilidade de acessibilidade durante o verão.

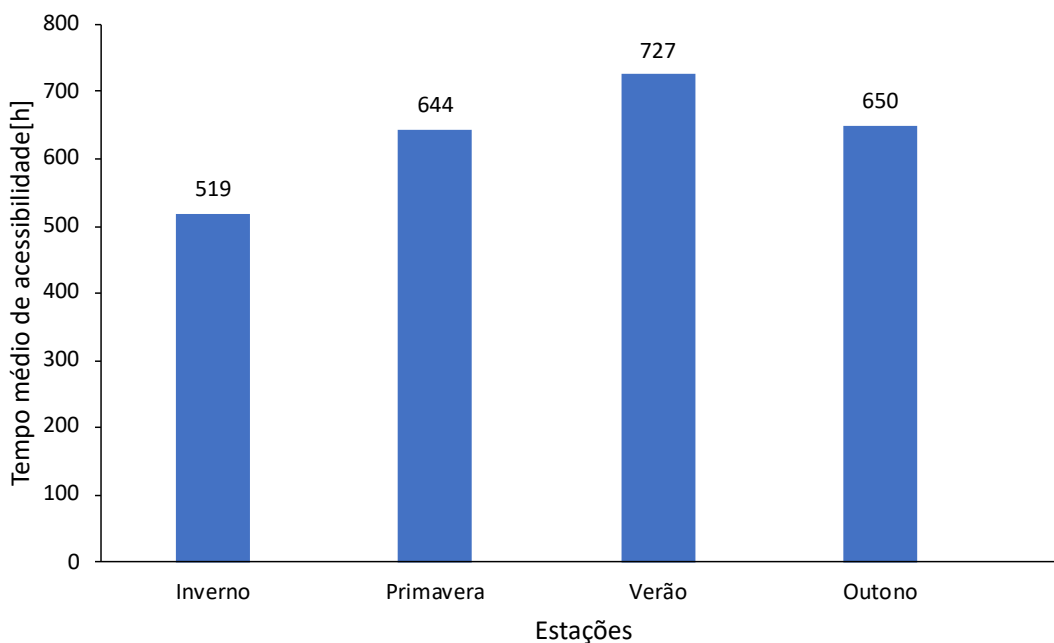


Figura 18 – Tempo médio sazonal de acessibilidade.

4.3.4. Variabilidade anual de inacessibilidade

A Figura 19 apresenta a evolução dos períodos de inacessibilidade ao longo dos 81 anos analisados. Verifica-se uma média anual de 46 dias, com um desvio padrão de 11,3 dias. O maior valor ocorreu em 2018, com 79 dias de inacessibilidade, enquanto o menor foi registado em 1944, com apenas 24 dias. Estes resultados indicam que, apesar de alguma variabilidade, os períodos de inacessibilidade mantêm uma distribuição relativamente estável ao longo da série histórica. Adicionalmente, no ano de 2014 houve 74 dias de inacessibilidade, como mostrado por Fontán-Bouza et al. (2014), em particular, entre dezembro de 2013 e fevereiro de 2014 registou-se o maior número de tempestades consecutivas na boia de Leixões, justificando um inverno marítimo muito energético e que claramente condiciona o resultado observado em 2014.

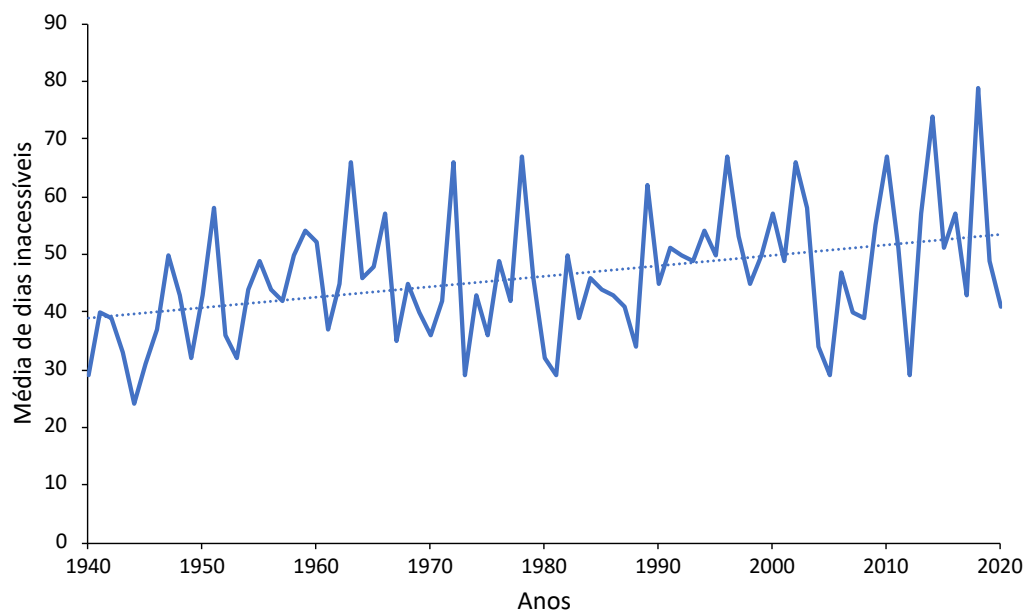


Figura 19 – Média anual de dias inacessíveis.

4.4. Cenário de Gray et al., 2015 como critério de acessibilidade

4.4.1. Variabilidade Anual

O cenário descrito na Figura 5 pela linha azul inferior é representado na Figura 20 por meio de um mapa de calor que relaciona os valores de altura significativa de onda (H_s) e período de pico (T_p). Nessa figura, a área demarcada em linhas tracejadas vermelhas corresponde às condições de mar em que é viável a execução das atividades de O&M.

Resultados e Discussão

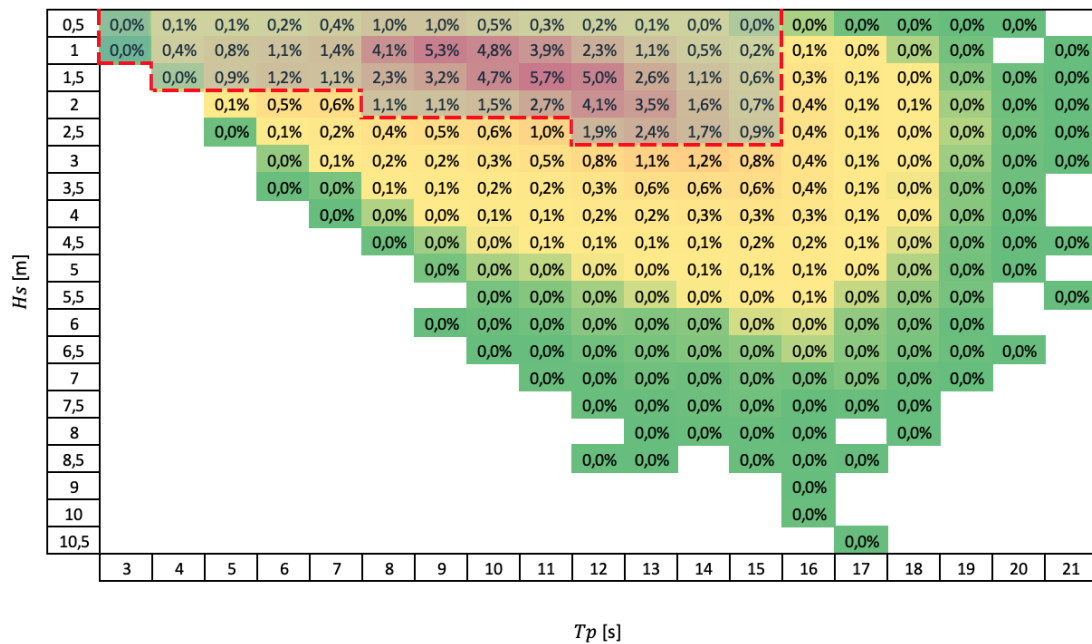


Figura 20 – Mapa de calor delimitado pelos critérios de acessibilidade.

A análise do mapa de calor construído a partir da série temporal de estados de mar, apresentado na Figura 20, demonstra que, segundo os limites de acessibilidade considerados — ou seja, $6 \leq T_p \leq 7$ s para $H_s \leq 1,5$ m, aumentando progressivamente até $H_s \leq 2,5$ m no intervalo $13 \leq T_p \leq 15$ s —, o cenário avaliado garante um elevado grau de acessibilidade. Ao longo dos 81 anos estudados, constatou-se que 81,5% das condições observadas se encontram dentro dos limites definidos.

No âmbito da avaliação da variabilidade anual para a região do Porto de Sines, Figura 21, apresenta a média anual de dias acessíveis considerando um horizonte temporal de 81 anos (1940–2020). Ao longo desse período, a média foi de 295 dias acessíveis por ano. Observa-se, contudo, uma tendência de redução no número de dias disponíveis para acesso. O valor mínimo registado ocorreu em 2018, com 258,8 dias, enquanto o máximo foi identificado em 1945, alcançando 331 dias. Apesar da tendência decrescente, o desvio padrão de 14,7 dias demonstra uma variação relativamente reduzida, o que aponta para uma previsibilidade consistente da acessibilidade marítima ao longo das oito décadas analisadas.

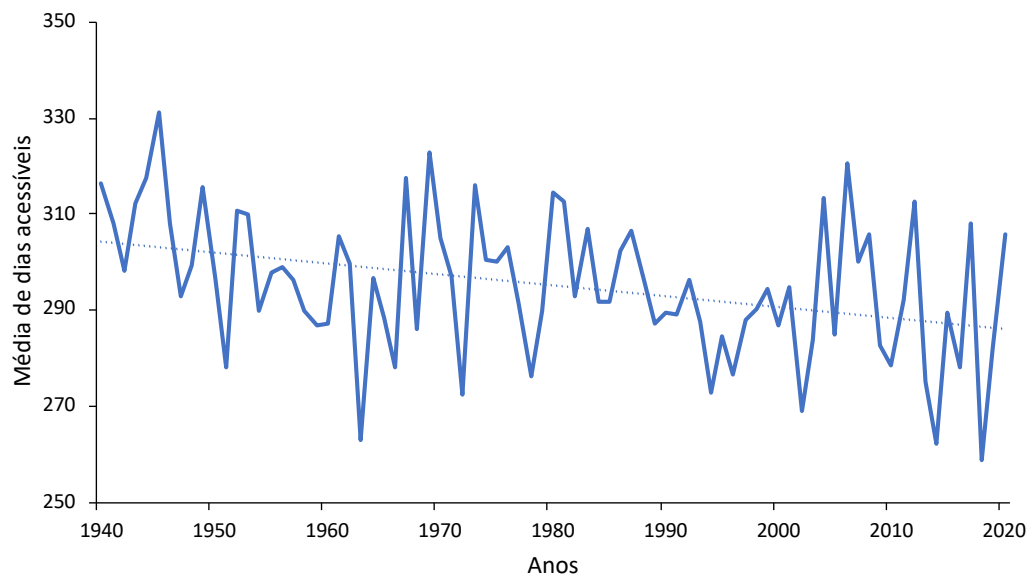


Figura 21 – Média anual de dias acessíveis.

A Figura 22 ilustra a quantidade de janelas de manutenção registradas ao longo do período analisado. Neste trabalho, definiu-se como janela de manutenção a sequência temporal de estados de mar favoráveis com duração mínima de 12 horas. Constatou-se que o menor número ocorreu em 1941, com 38 janelas identificadas, enquanto o maior valor foi observado em 2002, totalizando 71 janelas. Para todo o intervalo considerado, obteve-se uma média anual de 52,4 janelas de manutenção, associada a um desvio padrão próximo de 6,8. Dessa forma, ao longo dos 81 anos avaliados (1940–2020), evidencia-se uma tendência de crescimento no número de janelas disponíveis para manutenção.

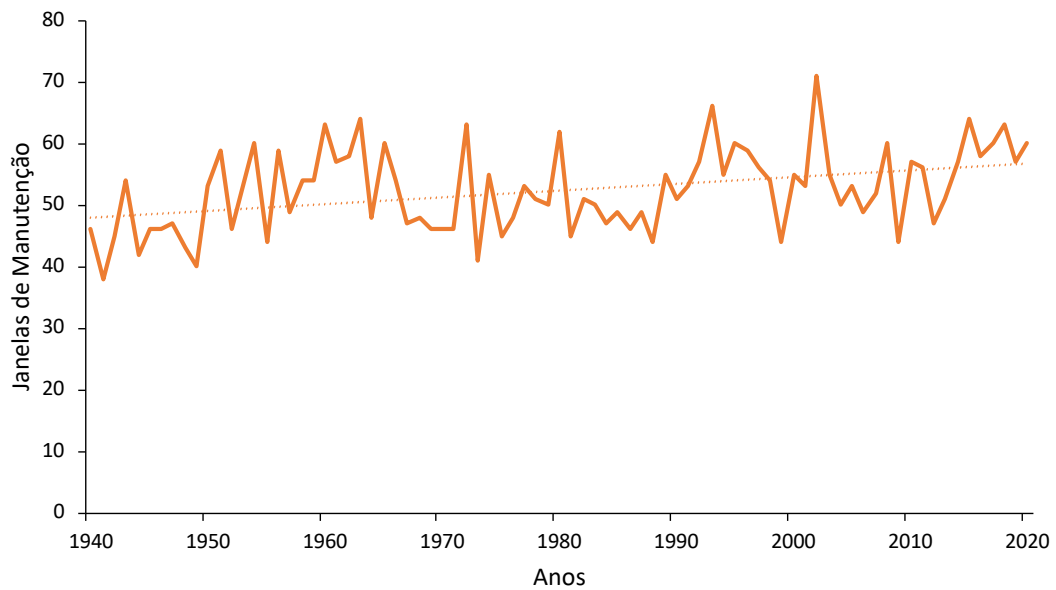


Figura 22 – Janelas anuais de manutenção.

4.4.2. Variabilidade Mensal

Ao longo do ano, observa-se uma variação expressiva no número de horas de acessibilidade por mês, conforme ilustrado na Figura 23. O mês de fevereiro, considerando a média de todos os febreiros das oito décadas analisadas, apresenta o menor tempo de acessibilidade, com 423,6 horas, equivalentes a aproximadamente 18 dias. Nos meses subsequentes, verifica-se uma tendência de aumento do tempo médio de acessibilidade, atingindo o máximo em agosto, com 718 horas em média, correspondentes a cerca de 30 dias, ou seja, a totalidade do mês. A partir de setembro até o mês seguinte de fevereiro, observa-se uma redução gradual no tempo médio de acessibilidade.

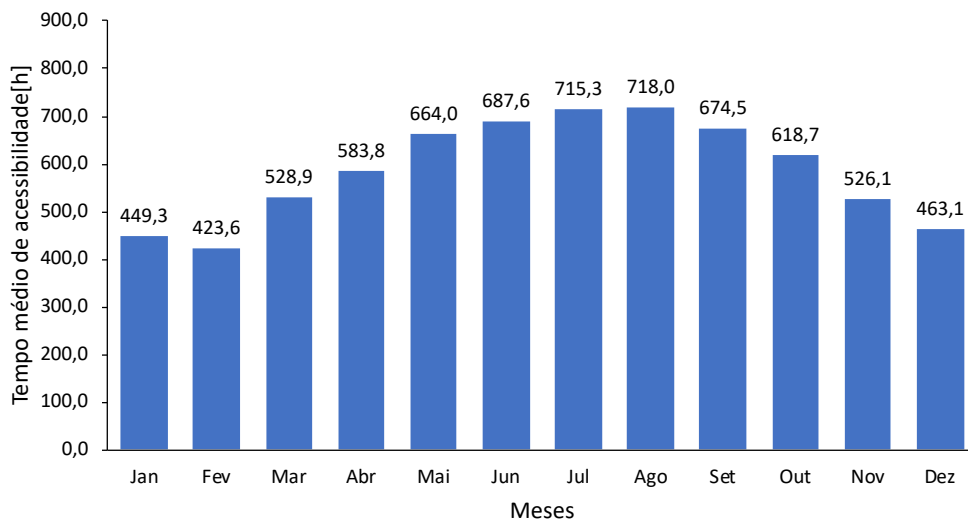


Figura 23 – Tempo médio mensal de acessibilidade.

Com base na Figura 24, que apresenta o tempo médio de acessibilidade ao longo dos meses por meio da linha central azul, é possível analisar o comportamento da média em conjunto com a adição e subtração dos desvios padrão (linhas tracejadas). Observa-se que os meses de inverno apresentam maior variabilidade. Destacam-se os meses de novembro a março, que registra o maior desvio padrão entre 124,9 h em janeiro e 105,5 h em março. Em contraste, os meses de verão apresentam valores de dispersão muito baixos, como junho (26,2 h), julho (26,6 h) e agosto (23,9 h), indicando maior estabilidade das condições de acesso nesse período. De maneira geral, os meses entre abril e outubro se destacam por oferecerem melhores condições de acessibilidade, tanto pela maior disponibilidade média de horas quanto pela menor variabilidade entre os anos.

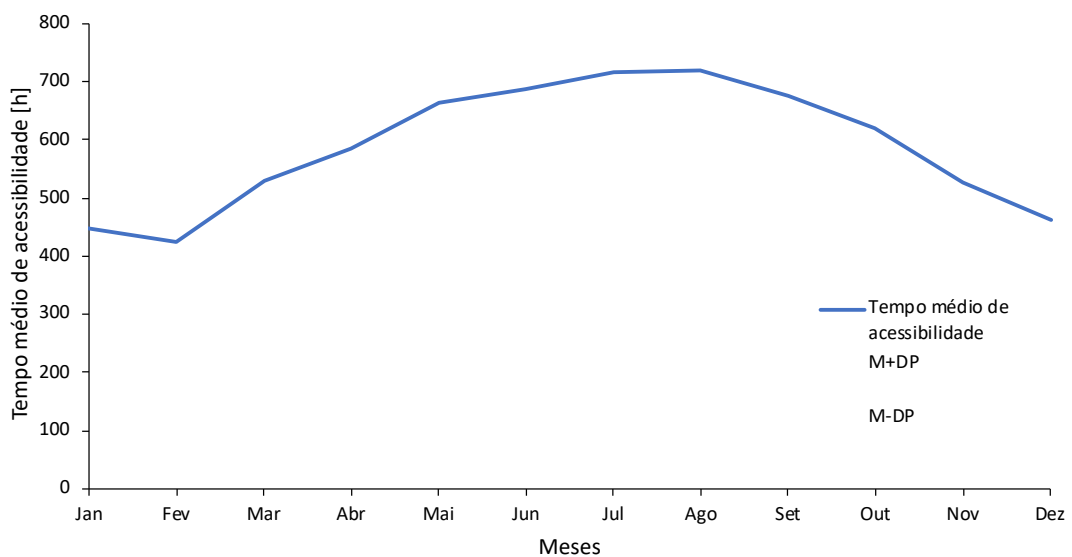


Figura 24 – Tempo médio e desvio padrão mensal de acessibilidade.

4.4.3. Variabilidade Sazonal

Considerando a análise sazonal presente na Figura 25, se verifica que o inverno apresenta o menor tempo médio de acessibilidade, com 445 h, refletindo a maior ocorrência de condições desfavoráveis ao longo desta estação. A primavera registra uma melhoria significativa, alcançando em média 592 h de acessibilidade, tendência que se intensifica no verão, apresentando o valor mais elevado com 707 h, correspondendo ao período mais favorável do ano referente à acessibilidade. Já no outono observa-se uma ligeira redução para 606 h, ainda assim mantendo valores superiores aos do inverno. Estes resultados evidenciam a forte influência da sazonalidade, com condições mais restritivas nos meses de inverno e maior disponibilidade de acessibilidade durante o verão.

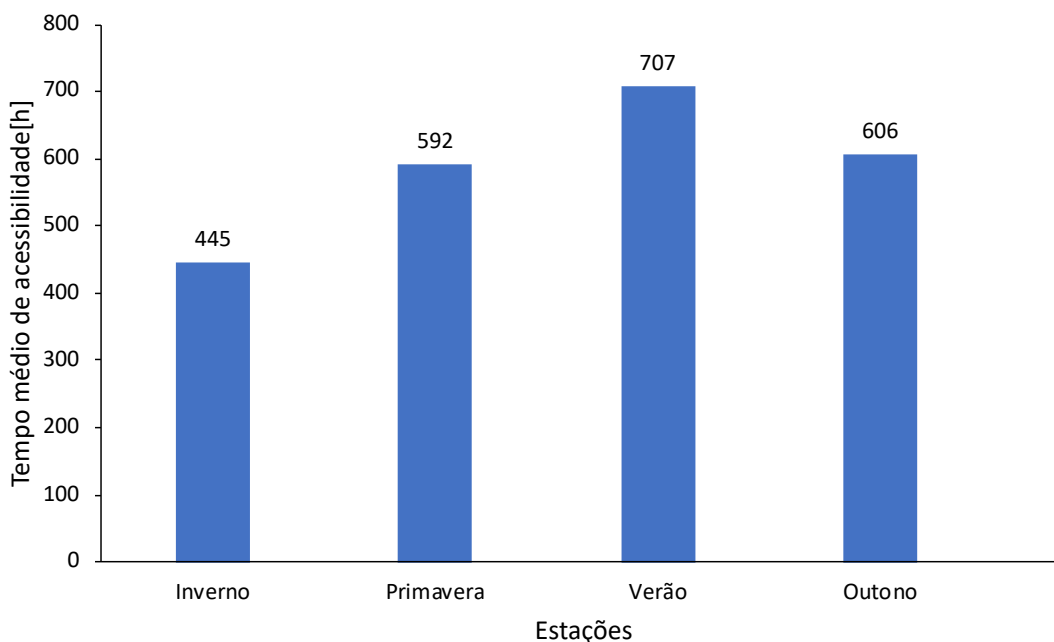


Figura 25 – Tempo médio sazonal de acessibilidade.

4.4.4. Variabilidade anual de inaccessibilidade

A Figura 26 apresenta a evolução dos períodos de inaccessibilidade ao longo dos 81 anos analisados. Observa-se uma média anual de 67,7 dias, com desvio padrão de 14,1 dias. O valor máximo ocorreu em 2018, com 106 dias de inaccessibilidade, enquanto o mínimo foi registrado em 1944, com apenas 36 dias. Esses resultados indicam que, apesar de alguma variabilidade, os períodos de inaccessibilidade apresentam uma distribuição relativamente estável ao longo da série histórica.

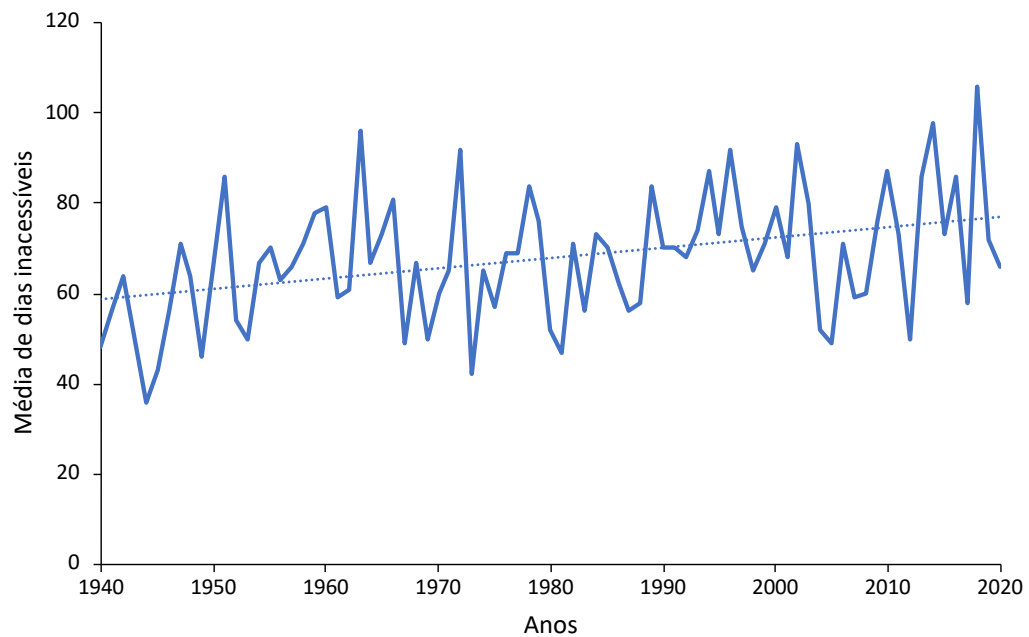


Figura 26 – Média anual de dias inacessíveis.

4.5. Cenário 2 como critério de acessibilidade

4.5.1. Variabilidade Anual

O cenário 2 apresentado na Figura 6 é detalhado na Figura 27 por meio de um mapa de calor que ilustra a ocorrência conjunta dos valores de altura significativa de onda (H_s) e período de pico (T_p). Nesse contexto, a região delimitada por linhas tracejadas em vermelho corresponde às condições de mar consideradas favoráveis à execução das atividades de O&M.

Resultados e Discussão

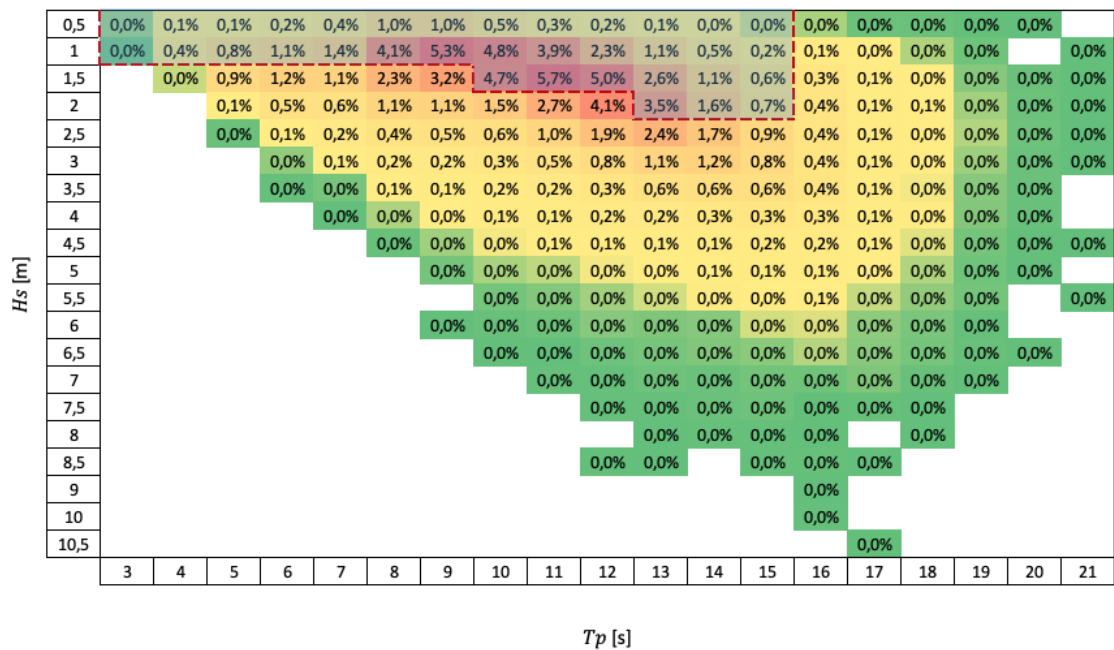


Figura 27 – Mapa de calor delimitado pelos critérios de acessibilidade.

A análise do mapa de calor, construído a partir da série temporal de estados de mar e apresentado na Figura 27, evidencia que, de acordo com os limites de acessibilidade considerados — isto é, $6 \leq T_p \leq 7$ s para $H_s \leq 1$ m, com aumento progressivo até $H_s \leq 2$ m no intervalo de $13 \leq T_p \leq 15$ s —, o cenário avaliado demonstra um grau moderado de acessibilidade. Ao longo dos 81 anos analisados, verificou-se que 55,2% das condições observadas enquadram-se dentro dos limites estabelecidos.

No âmbito da avaliação da variabilidade anual para a região do Porto de Sines, a Figura 28 apresenta a média de dias acessíveis ao longo de 81 anos (1940–2020). Nesse período, a média anual foi de 194 dias de acessibilidade. Verifica-se, entretanto, uma tendência de redução no número de dias disponíveis, com valor mínimo registado em 2002 (147 dias) e máximo em 1949 (239 dias). Apesar dessa tendência decrescente, o desvio padrão de 18,7 dias indica uma variabilidade relativamente baixa, o que sugere uma previsibilidade consistente da acessibilidade marítima ao longo das oito décadas analisadas.

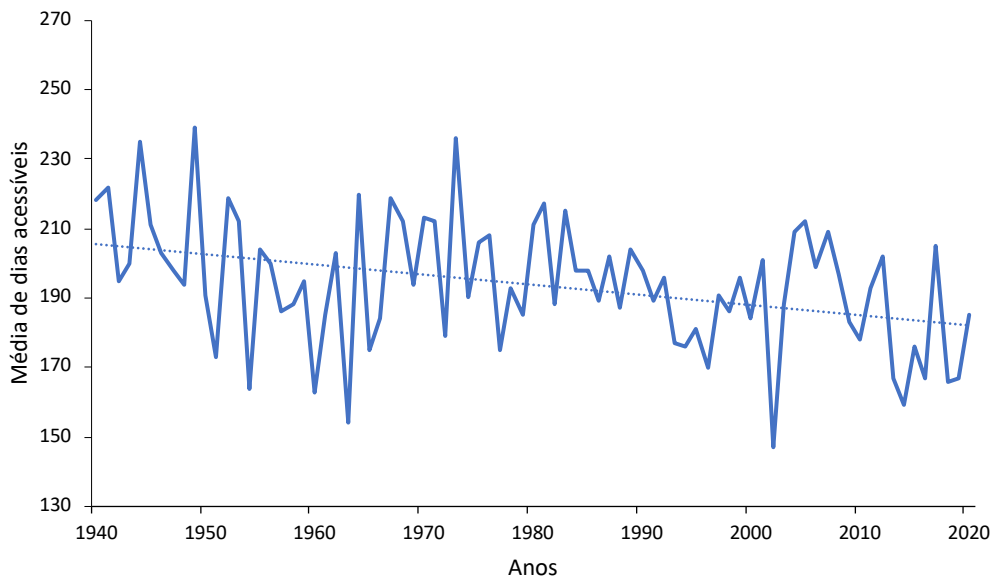


Figura 28 – Média anual de dias acessíveis.

A Figura 29 apresenta a quantidade de janelas de manutenção identificadas ao longo do período analisado. Neste estudo, considerou-se como janela de manutenção a sequência contínua de estados de mar favoráveis com duração mínima de 12 horas. O menor número foi registado em 1989, com 54 janelas, enquanto o máximo ocorreu em 1967, totalizando 92 janelas. Para todo o intervalo de 81 anos (1940–2020), obteve-se uma média anual de 74,9 janelas de manutenção, com desvio padrão de aproximadamente 8,5. Observa-se, portanto, uma tendência de manutenção da quantidade de janelas ao longo da série histórica.

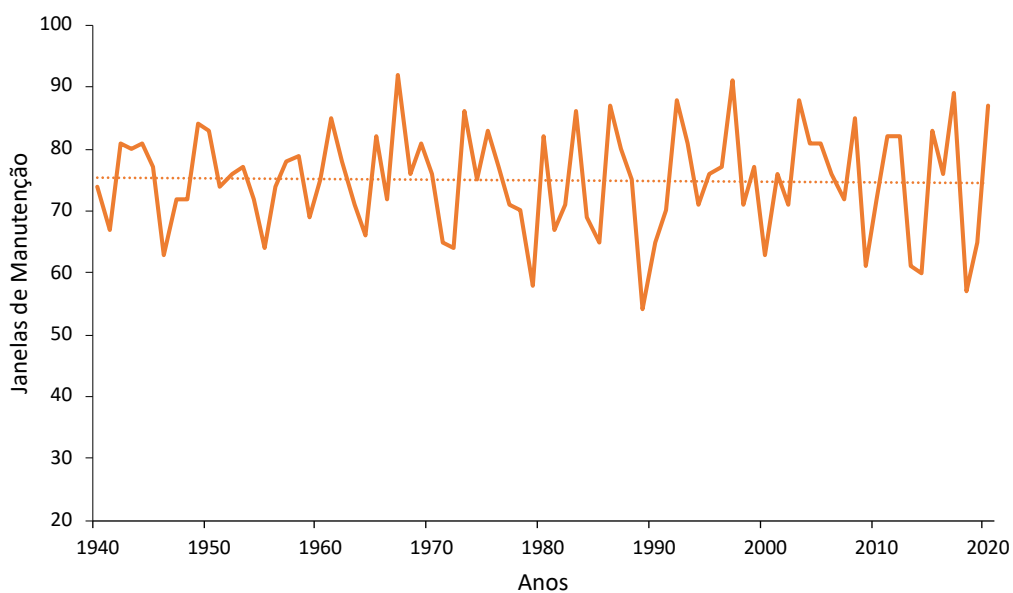


Figura 29 – Janelas anuais de manutenção.

4.5.2. Variabilidade Mensal

A Figura 30 apresenta a distribuição mensal do tempo médio de acessibilidade ao longo do ano, considerando a série histórica de oito décadas analisadas. O mês de fevereiro destaca-se por registar o menor valor, com 251 horas, o que corresponde a aproximadamente 10 dias de acessibilidade. Nos meses seguintes, observa-se uma tendência de crescimento gradual, alcançando o valor máximo em setembro, com 513 horas em média, equivalentes a cerca de 21 dias, representando dois terços do mês. A partir de outubro, inicia-se um processo de redução progressiva no tempo médio de acessibilidade, que se estende até fevereiro do ano seguinte. Esse comportamento evidencia um padrão sazonal marcado, no qual os meses de verão concentram as condições mais favoráveis, enquanto o período de inverno se associa às maiores restrições de acesso.

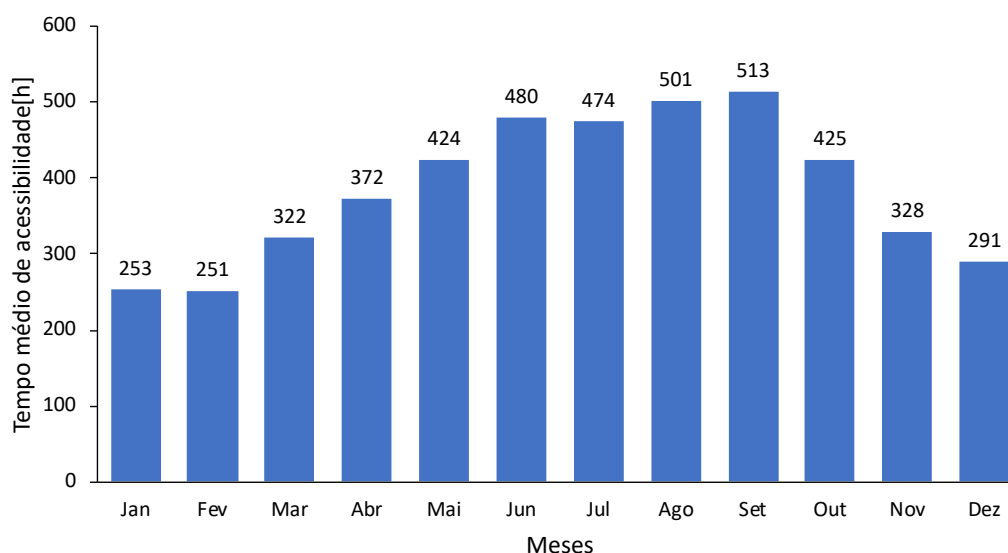


Figura 30 – Tempo médio mensal de acessibilidade.

O tempo médio de acessibilidade ao longo dos meses, acompanhado dos respectivos desvios padrão, permite analisar a variabilidade entre os períodos do ano. Os meses de maior dispersão concentram-se entre novembro e março, com desvios que variam de 136,4 h em novembro a 134,8 h em março. Os meses de junho, julho e agosto apresentam valores semelhantes aos meses mais energéticos, de 93,8 h, 105,5 h e 86,4 h, respectivamente. Para o cenário 2 apresentado, observa-se que apesar de ocorrer variação significativa entre as médias dos meses os valores de desvio padrão elevados não permitem uma boa previsibilidade. Os dados de desvio padrão e média podem ser observados na Figura 31.

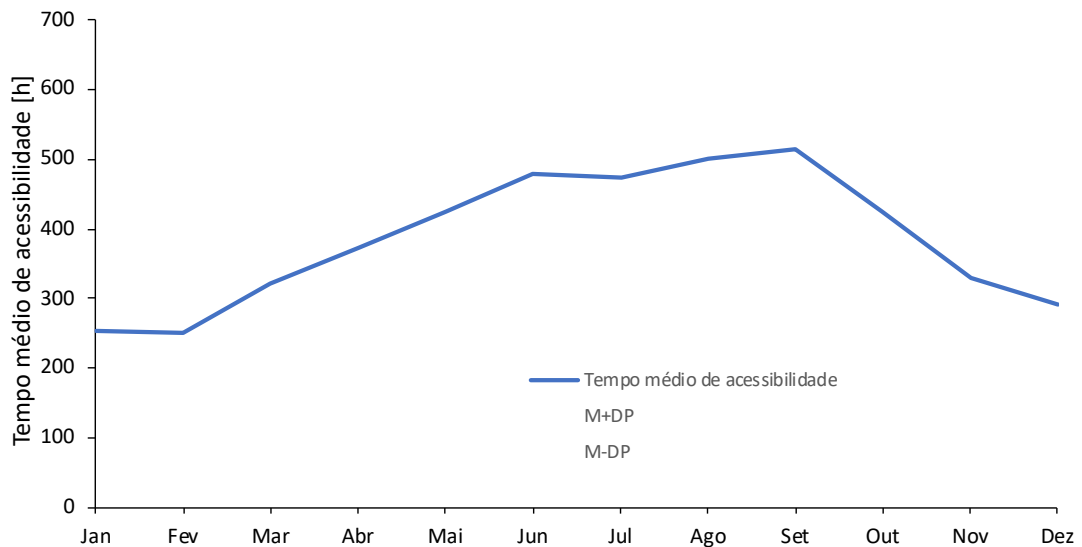


Figura 31 – Tempo médio e desvio padrão mensal de acessibilidade.

4.5.3. Variabilidade Sazonal

A análise sazonal da acessibilidade, apresentada na Figura 32, evidencia que o menor tempo médio ocorre durante o inverno, com 265 h, refletindo a maior ocorrência de condições desfavoráveis. Na primavera, observa-se uma melhoria significativa, com média de 372 h, tendência que se intensifica no verão, quando a acessibilidade atinge o valor máximo de 485 h, correspondente ao período mais favorável do ano. No outono, verifica-se uma redução ligeira para 422 h, ainda assim mantendo níveis superiores aos registrados no inverno. Esses resultados destacam a forte influência da sazonalidade, com restrições mais acentuadas durante o inverno e maior disponibilidade de acessibilidade no verão.

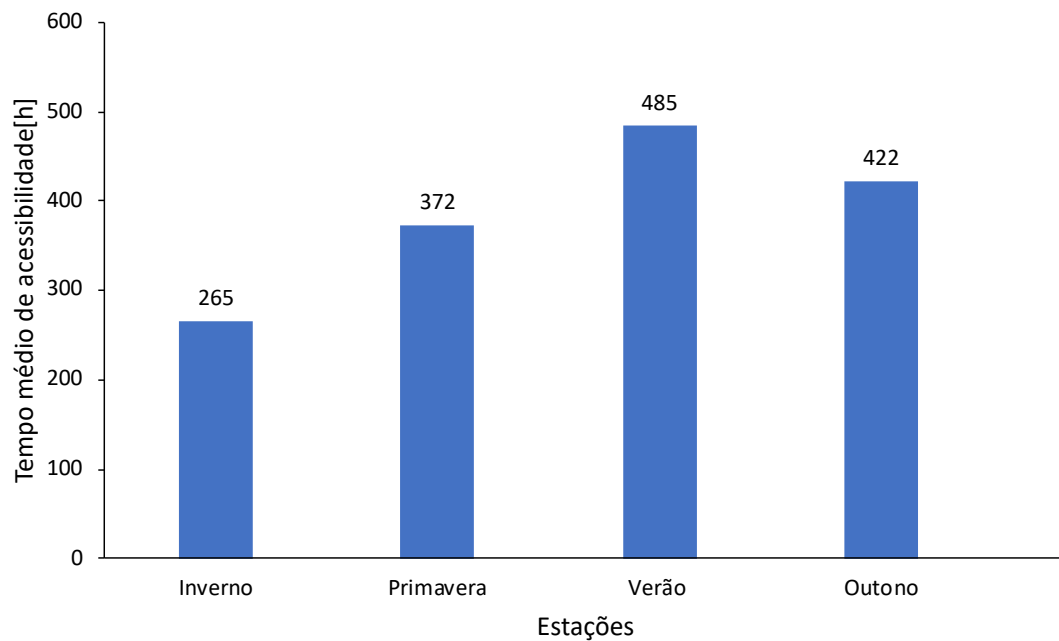


Figura 32 – Tempo médio sazonal de acessibilidade.

4.5.4. Variabilidade anual de inacessibilidade

A evolução dos períodos de inacessibilidade ao longo dos 81 anos analisados revela uma média anual de 163,7 dias, com desvio padrão de 19,2 dias. O maior valor foi registado em 2014, totalizando 212 dias de inacessibilidade, enquanto o menor ocorreu em 1973 com 120 dias. Apesar de certa variabilidade, os dados indicam que os períodos de inacessibilidade mantêm uma distribuição relativamente estável ao longo de toda a série histórica. A Figura 33 apresenta os resultados da variabilidade anual de inacessibilidade.

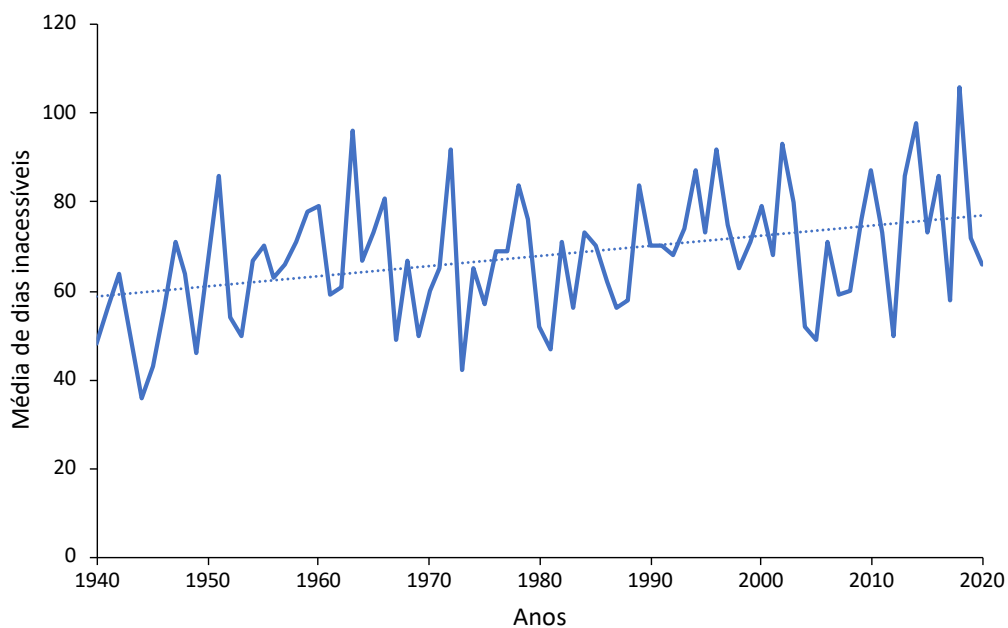


Figura 33 – Média anual de dias inacessíveis.

4.6. Cenário 3 como critério de acessibilidade

4.6.1. Variabilidade Anual

O cenário 3 apresentado na Figura 6 é demonstrado na Figura 34 por meio de um mapa de calor que ilustra a ocorrência conjunta dos valores de altura significativa de onda (H_s) e período de pico (T_p). A região delimitada por linhas tracejadas em vermelho corresponde às condições de mar consideradas favoráveis à execução das atividades de O&M.

Resultados e Discussão

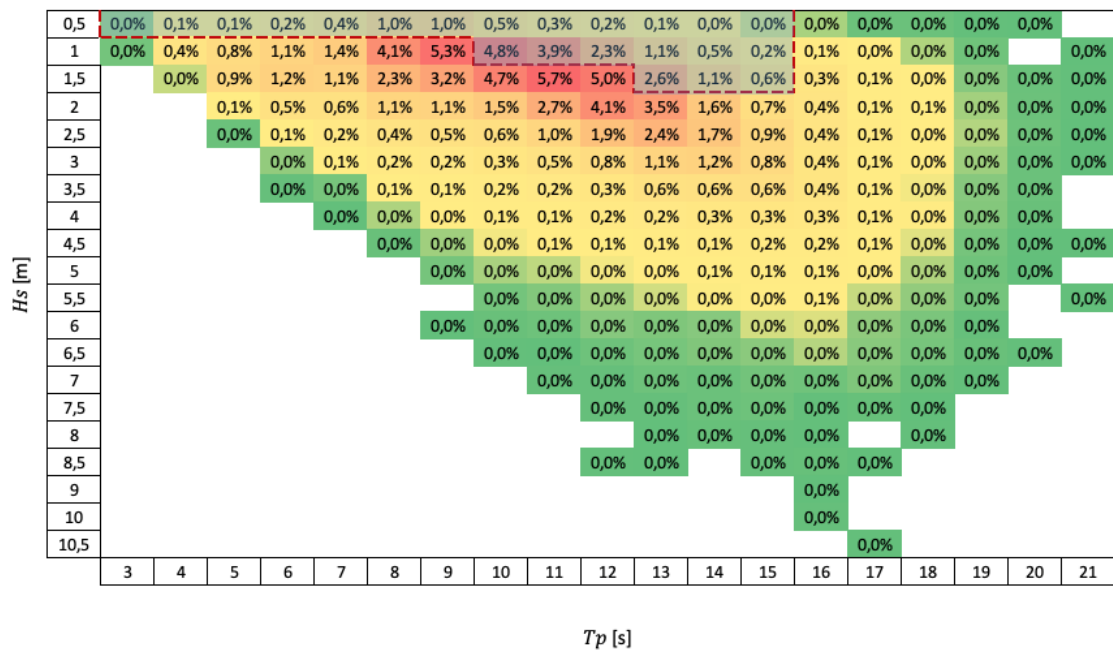


Figura 34 – Mapa de calor delimitado pelos critérios de acessibilidade.

A análise do mapa de calor, construído a partir da série temporal de estados de mar e apresentado na Figura 34, evidencia que, de acordo com os limites de acessibilidade considerados — isto é, $6 \leq T_p \leq 7$ s para $H_s \leq 0,5$ m, com aumento progressivo até $H_s \leq 1,5$ m no intervalo de $13 \leq T_p \leq 15$ s —, o cenário avaliado demonstra um grau muito baixo de acessibilidade. Ao longo dos 81 anos analisados, verificou-se que apenas 21% das ocorrências observadas enquadram-se dentro dos limites estabelecidos.

No âmbito da avaliação da variabilidade anual para a região do Porto de Sines, a Figura 35 apresenta a média de dias acessíveis ao longo de 81 anos (1940–2020). Nesse período, a média anual foi de 69,2 dias de acessibilidade. Verifica-se, entretanto, uma tendência de redução no número de dias disponíveis, com o valor mínimo registado em 2002 (41 dias) e o máximo em 2007 (103 dias). Apesar dessa tendência decrescente, o desvio padrão de 13,8 dias indica uma variabilidade relativamente baixa, evidenciando uma previsibilidade consistente da acessibilidade marítima ao longo das oito décadas analisadas.

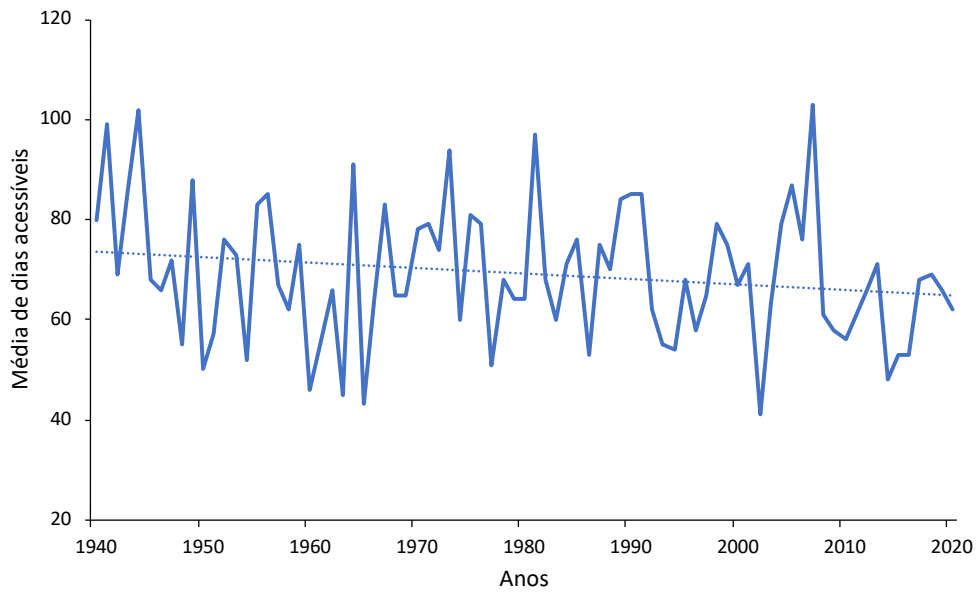


Figura 35 – Média anual de dias acessíveis.

A Figura 36 apresenta a quantidade de janelas de manutenção identificadas ao longo do período analisado. Neste estudo, considerou-se como janela de manutenção a sequência contínua de estados de mar favoráveis com duração mínima de 12 horas. O menor número foi registado em 1954, com 31 janelas, enquanto o máximo ocorreu em 2007, totalizando 62 janelas. Para todo o intervalo de 81 anos (1940–2020), obteve-se uma média anual de 47,8 janelas de manutenção, com desvio padrão de aproximadamente 6,9. Observa-se, portanto, uma tendência de manutenção da quantidade de janelas ao longo da série histórica.

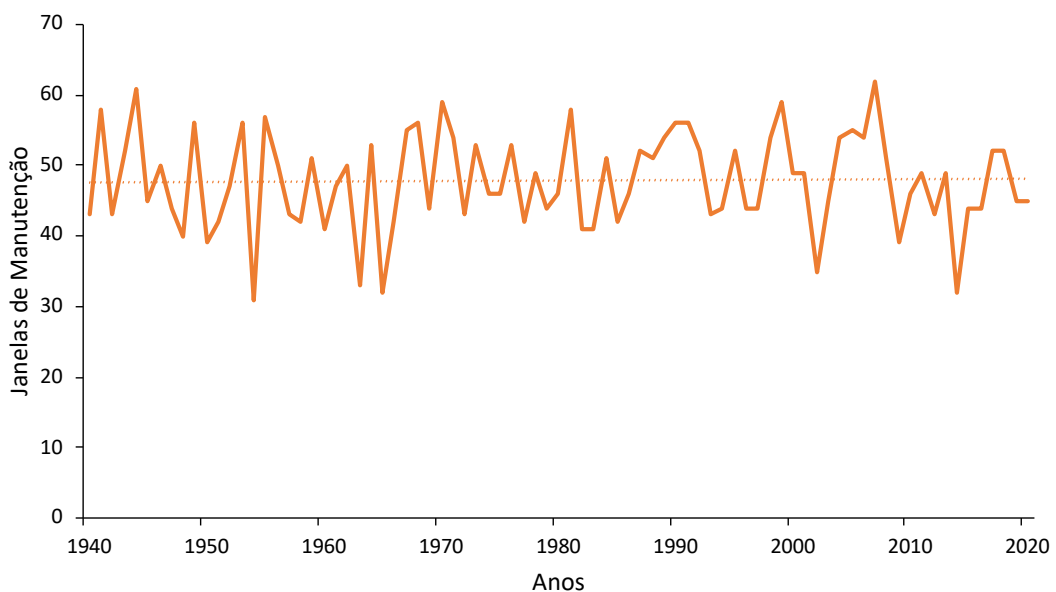


Figura 36 – Janelas anuais de manutenção.

4.6.2. Variabilidade Mensal

A distribuição mensal do tempo médio de acessibilidade ao longo do ano, considerando a série histórica de oito décadas, é apresentada na Figura 37. O menor valor é registado em fevereiro, com 92,8 horas, correspondentes a aproximadamente 4 dias de acessibilidade. Nos meses subsequentes, observa-se uma tendência de aumento gradual, atingindo o máximo em junho, com 156,7 horas em média, equivalentes a cerca de 7 dias. A partir de setembro, o tempo médio de acessibilidade inicia um declínio progressivo, estendendo-se até fevereiro do ano seguinte. Esse comportamento mostra um novo padrão sazonal, com condições mais favoráveis nos meses de verão e também no outono. Nesta análise os valores de acessibilidade apesar de valores mais baixos apresentam uma menor variação entre si.

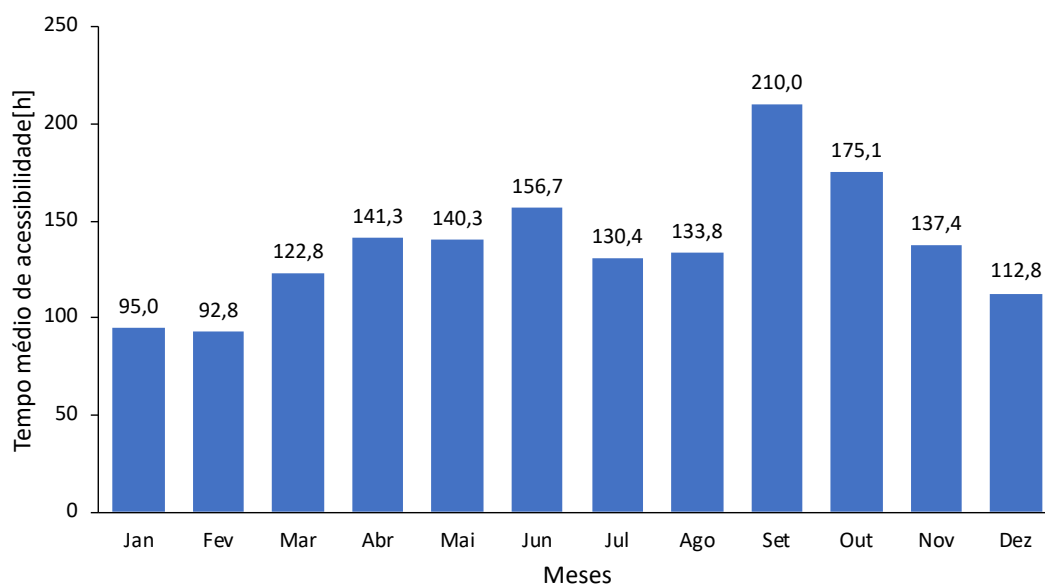


Figura 37 – Tempo médio mensal de acessibilidade.

O tempo médio de acessibilidade ao longo dos meses é representado na Figura 38, acompanhado dos respetivos desvios padrão, permite analisar a variabilidade entre os períodos do ano. Os meses de maior dispersão concentram-se entre junho e outubro, com desvios que variam de 117 h em setembro a 46,8 h em julho. Para o cenário 3 apresentado, observa-se que distribuição dos valores mais elevados ocorreu em meses do outono (setembro e outubro).

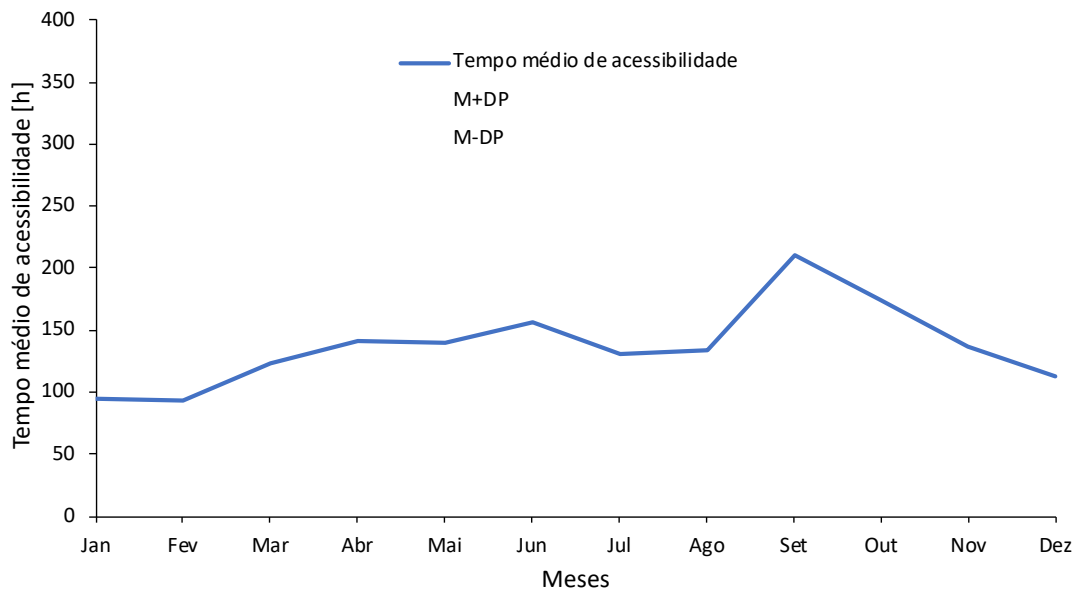


Figura 38 – Tempo médio e desvio padrão mensal de acessibilidade.

4.6.3. Variabilidade Sazonal

A análise sazonal da acessibilidade, representada na Figura 39, evidencia que o menor tempo médio ocorre durante o inverno, com 100 h, refletindo a maior ocorrência de condições desfavoráveis. Na primavera, observa-se uma melhoria significativa, com média de 135 h, tendência que se intensifica no verão, atingindo 140 h. No outono, verifica-se a maior ocorrência de horas de acessibilidade com média de 174 h de acessibilidade. Após ocorre uma diminuição da disponibilidade até o inverno. Esses resultados destacam a forte influência da sazonalidade, com restrições mais acentuadas durante o inverno e maior disponibilidade de acessibilidade nos meses mais quentes.

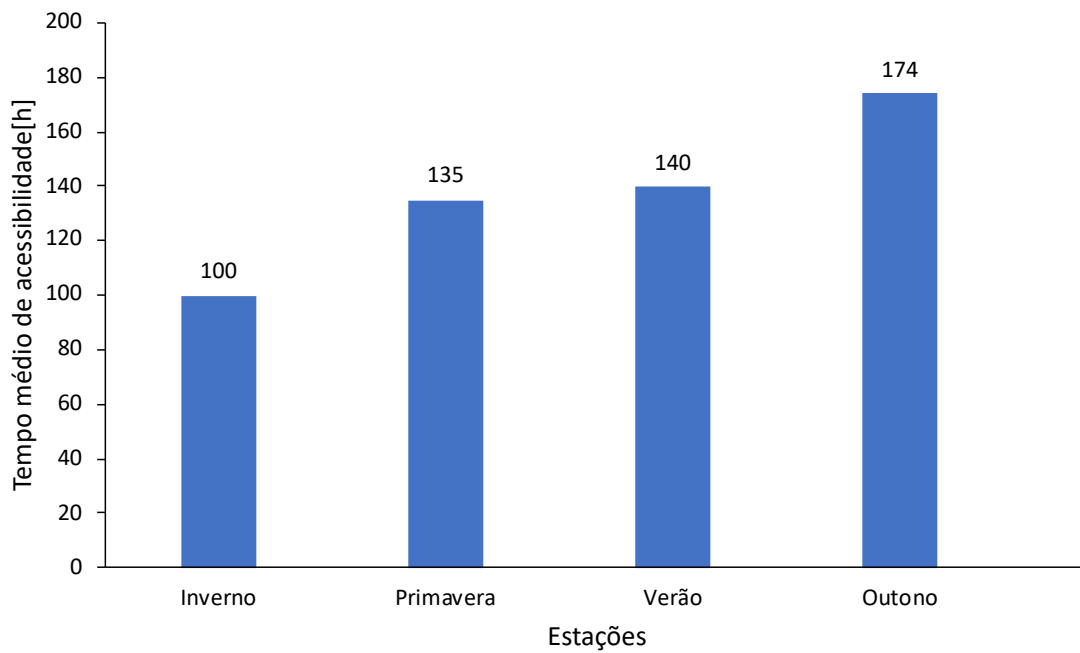


Figura 39 – Tempo médio sazonal de acessibilidade.

4.6.4. Variabilidade anual de inaccessibilidade

A distribuição dos períodos de inaccessibilidade ao longo dos 81 anos analisados revela uma média anual de 288,5 dias, com desvio padrão de 17,5 dias. O maior valor foi registado em 2014, totalizando 328 dias de inaccessibilidade, enquanto o menor ocorreu em 1981 com 240 dias. Apesar de certa variabilidade, os dados indicam que os períodos de inaccessibilidade mantêm uma distribuição relativamente estável ao longo de toda a série histórica. A Figura 40 apresenta a variabilidade anual de inaccessibilidade.

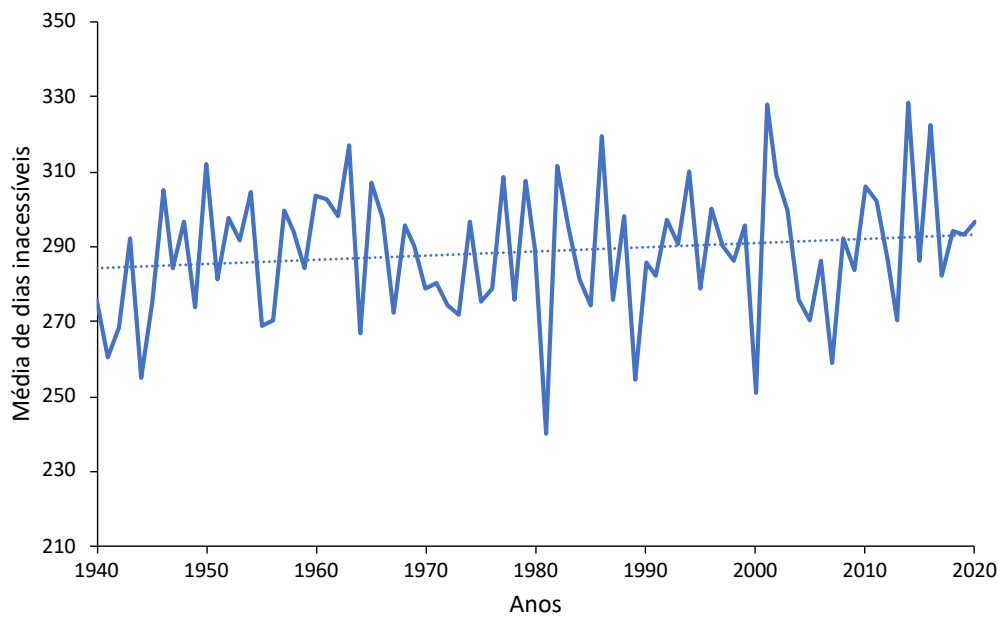


Figura 40 – Média anual de dias inacessíveis.

4.7. Variabilidade sazonal de inacessibilidade dos diferentes cenários

A probabilidade acumulada da persistência das condições de inacessibilidade fornece informações relevantes para o processo de operação e manutenção de um dispositivo instalado tanto em condições perto da costa ou ao largo. A partir deste dado é possível estimar para a localidade em questão, qual a probabilidade que uma janela de inacessibilidade pode durar.

Os cenários que são apresentados a seguir nesta secção são introduzidos inicialmente na Figura 41 pelas novas condições em complemento aos critérios apresentados por Gray (2015).

Resultados e Discussão

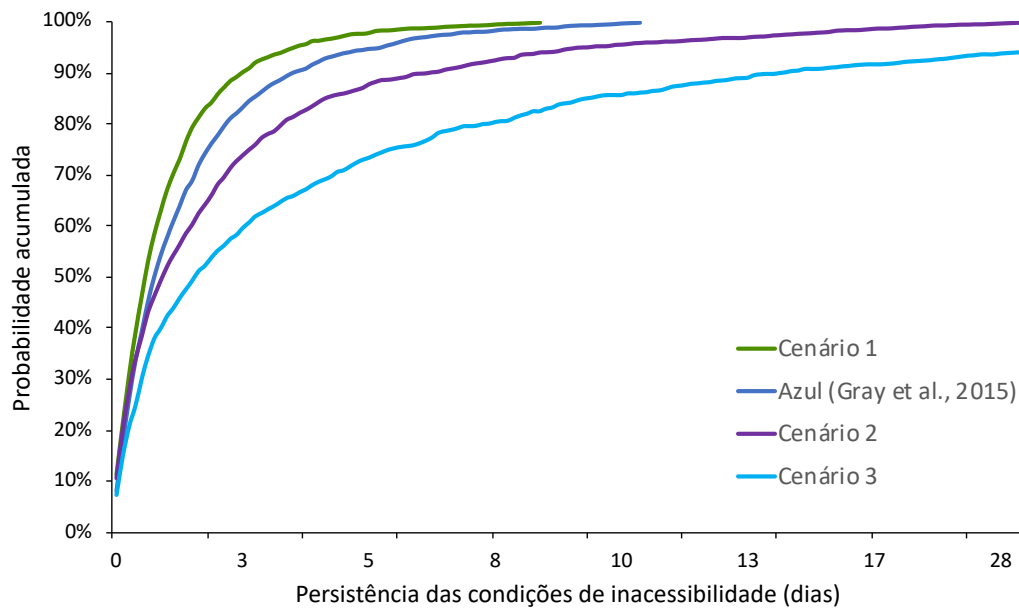


Figura 41 – Persistência das condições de inacessibilidade vs Probabilidade acumulada para o inverno.

Para a análise sazonal de inverno, período mais energético do ano, é possível observar que as condições de mar tendem a durar mais dias, isto é, para o cenário 3 há uma probabilidade acumulada de 62% de um evento de inacessibilidade durar três dias ou menos. Considerando o mesmo ponto para o cenário 2 existe uma probabilidade acumulada de 76% de um evento de inacessibilidade durar ao menos três dias. Em adicional para o cenário proposto por Gray, há um avanço para 86% para o mesmo critério de duração ao menos de três dias. Por final o cenário 1, sendo este o mais robusto, há um acréscimo até 92% para a probabilidade de duração menor do que três dias. A Figura 42 representa a persistência das condições de inacessibilidade para uma probabilidade acumulada para a estação de inverno.

Considerando o parâmetro de probabilidade acumulado fixo em 95% a análise mostra quantos dias ou menos um estado de mar inacessível pode durar. Para o cenário 1 se obtém o valor menor ou igual a quatro dias, logo a frente com cinco dias o critério de Gray atinge o critério fixado em 95%, ambos os parâmetros localizados abaixo desta demonstram um significativo aumento, respectivamente para o cenário 2 e 3 tem-se 10 e 35 dias. É importante ressaltar que existe uma pequena diferença entre os valores apresentados pelo critério de Gray e pelo cenário 1, porém se observa uma variação maior se comparando critério 2 e 3.

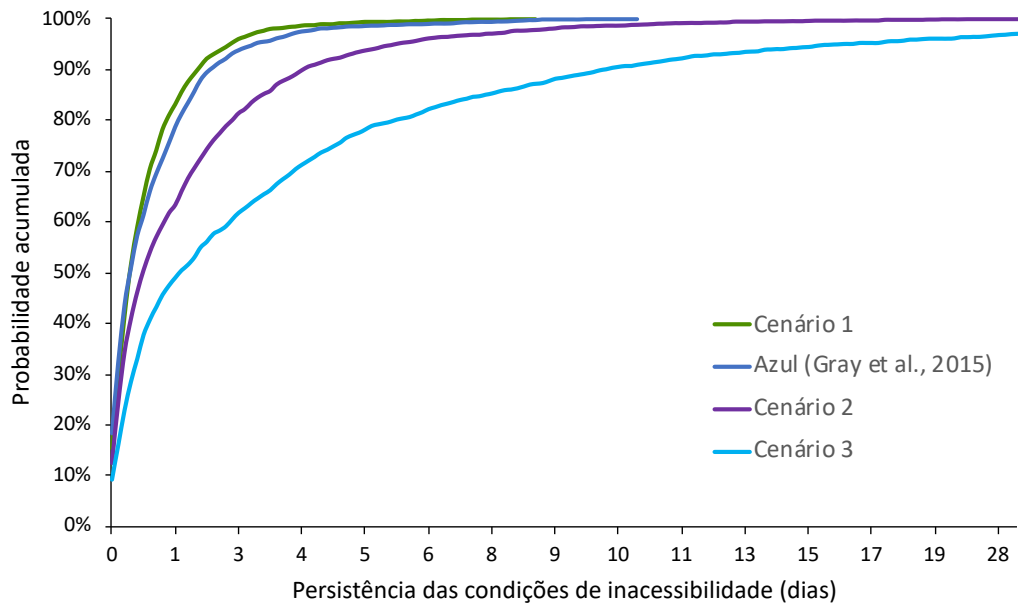


Figura 42 – Persistência das condições de inacessibilidade vs Probabilidade acumulada para a primavera.

Como pudemos acompanhar durante esta discussão de resultados os gráficos de sazonalidade e de médias de acessibilidade mensal comprovam a influência que cada período do ano tem. O Período de primavera observado na Figura 43 apresenta uma ampliação dos períodos de acessibilidade se comparado com o período de inverno. Desta forma para os cenários 2 e 3, há um acréscimo para 87% e 65%, para as condições mais permissivas há um avanço para 95% e 98% de que a duração do evento de inacessibilidade seja menor ou igual a três dias. Tratando das probabilidades de ocorrência fixando a 95% em ordem decrescente temos dias para as condições superiores e para as condições inferiores cenários 2 e 3 respectivamente seis e 15 dias ou menos.

Resultados e Discussão

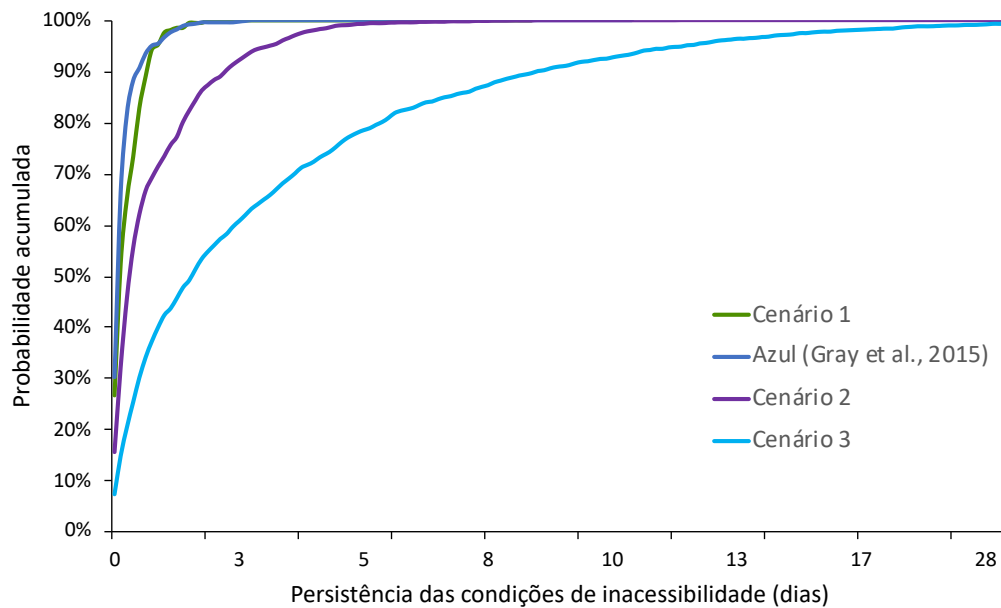


Figura 43 – Persistência das condições de inacessibilidade vs Probabilidade acumulada para o verão.

A condição de verão presente na Figura 43 mostra uma grande diferença entre as curvas de cenário 2 e 3 novamente, bem como uma pequena diferença entre as curvas de cenário 1 e Gray. Em situação de verão em grande maioria se apresentam as maiores durações de acessibilidade. Ao fixarmos a duração da persistência de inacessibilidade menor ou igual a 1 para o critério de Gray o valor de 93% é obtido, não distante para o cenário 1 corresponde à 95% de probabilidade. As curvas dos cenários 2 e 3 apresentam para o parâmetro igual o inferior a 1 é de probabilidade 67% e 44% e estabelecendo em 95% de probabilidade como parâmetro fixo temos três e 12 dias.

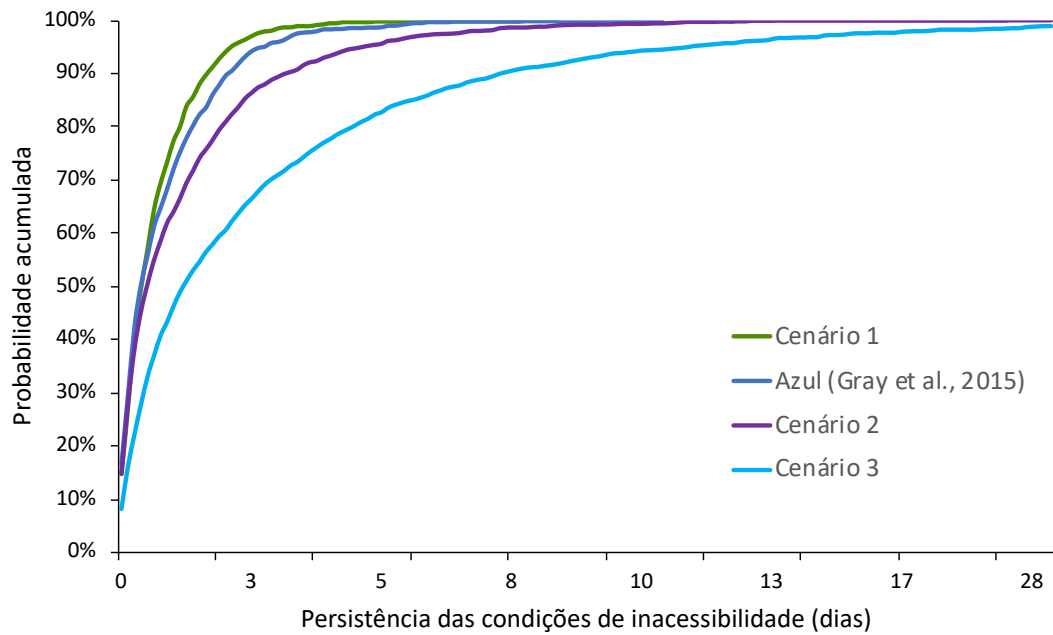


Figura 44 – Persistência das condições de inacessibilidade vs Probabilidade acumulada para o outono.

A Figura 44 apresenta a persistência das condições de inacessibilidade vs a probabilidade acumulada para as quatro condições estudadas para a estação outono. Ao fixar o parâmetro de persistência em dias se identifica uma forte relação com o período de primavera. Em analogia podemos comparar os dados do cenário 2 para primavera a probabilidade de ocorrer um período de três dias ou menos é de 85% e em comparação ao período de outono obtemos 88% para a mesma persistência.

5. Conclusão

5.1. Conclusões finais

O presente estudo permitiu analisar as janelas de manutenção disponíveis para operação de um WEC a ser instalado no Porto de Sines (Sines, Portugal), utilizando dados de reanálise ERA5 como substituição aos dados *in situ*. A validação realizada por Dos Santos (2023) demonstrou alta confiabilidade dos dados de Hs e Tp, com forte correlação com os dados de boia, enquanto a direção de onda apresentou maior dispersão. Apesar disso, análises adicionais de *bias* e RMSE indicaram concordância satisfatória, garantindo que os dados de ERA5 podem ser utilizados para avaliações de acessibilidade operacional com segurança.

Para a análise, foram definidos critérios específicos de acessibilidade com base em estudos anteriores e limites operacionais de segurança do WEC. O cenário de referência definido por Gray (2015) considerou $H_s \leq 1,5$ m para $6 \leq T_p \leq 7$ s, aumentando progressivamente até $H_s \leq 2,5$ m para $13 \leq T_p \leq 15$ s. Cenários alternativos foram estabelecidos para avaliar a sensibilidade da operação frente a condições de mar mais restritivas ou permissivas, sendo eles:

- Cenário 1: limite intermediário, $H_s \leq 1,5$ m para Tp baixo e até 2,5 m para Tp alto, resultando em acessibilidade levemente inferior ao cenário definido por Gray (2015);
- Cenário 2: mais permissivo, permitindo maiores Hs para Tp alto, resultando em maior fragmentação de janelas;
- Cenário 3: mais restritivo, $H_s \leq 0,5$ m para Tp baixo e até $H_s \leq 1,5$ m para Tp alto, apresentando baixa acessibilidade e períodos longos de inacessibilidade.

Ao longo das oito décadas (1940–2020), o cenário 1 revelou elevada acessibilidade, com média de 317 dias acessíveis por ano e desvio padrão de 11,9 dias, indicando boa previsibilidade anual. Em contraste, o cenário de referência apresentou média anual de 295 dias; o cenário 2, 194 dias; e o cenário 3, por sua vez, apenas 69 dias, evidenciando que a definição de critérios impacta fortemente a quantidade de dias disponíveis para manutenção.

O número de janelas de manutenção também apresentou variação significativa. O cenário 1 registou média anual de 41,4 janelas; o cenário de referência, 52,4; o cenário 2, 74,9; e o cenário 3, 47,8. Observa-se que cenários mais permissivos aumentam o número de oportunidades curtas, enquanto critérios restritivos reduzem a acessibilidade total. Essa fragmentação crescente das janelas é consequência direta da distribuição temporal dos estados de mar, com períodos de mar mais calmo concentrados em blocos curtos, especialmente no verão.

Conclusão

A variação mensal do tempo de acessibilidade evidenciou diferenças importantes entre os cenários. No cenário 1, fevereiro apresentou o menor tempo médio de acessibilidade, com 495 h (aproximadamente 21 dias), enquanto julho apresentou 737 h (aproximadamente 31 dias). Nos meses de inverno, os desvios padrão foram elevados — dezembro, 103,9h; janeiro, 119,4 h; e fevereiro, 91,5h — refletindo maior imprevisibilidade e menor estabilidade operacional. Já nos meses de verão, a dispersão foi mínima — junho, 6,7 h; julho, 3,1 h; e agosto, 7,3 h — indicando condições estáveis e favoráveis para planejamento de O&M.

No cenário de referência, fevereiro teve 423,6 h (aproximadamente 18 dias), máximo em agosto 718 h (aproximadamente 30 dias), com desvios padrão mais elevados no inverno, indicando maior variabilidade interanual. O cenário 2 apresentou fevereiro com 251 h (aproximadamente 10 dias) e setembro 513 h (aproximadamente 21 dias), enquanto o cenário 3 registou fevereiro com apenas 92,8 h (aproximadamente 4 dias) e junho 156,7 h (aproximadamente 7 dias), confirmando a redução da acessibilidade com critérios mais restritivos.

Essa análise permite concluir que, para o planejamento mensal, os meses de verão oferecem maior previsibilidade e segurança operacional, enquanto os meses de inverno demandam atenção especial devido à alta variabilidade e menores oportunidades de operação.

A sazonalidade foi avaliada para todas as estações, destacando padrões claros de acessibilidade:

- Inverno: menor tempo médio de acessibilidade (referência: 445 h; cenário 1: 519 h; cenário 2: 265 h; cenário 3: 100 h), refletindo a maior ocorrência de condições desfavoráveis e tempestades frequentes;
- Primavera: melhoria significativa, acessibilidade média aumentou (referência: 592 h; cenário 1: 644 h; cenário 2: 372 h; cenário 3: 135 h).
- Verão: período mais favorável, com acesso quase contínuo nos cenários mais permissivos (referência: 707 h; cenário 1: 727 h; cenário 2: 485 h; cenário 3: 140 h), permitindo planejamento de O&M de forma otimizada.
- Outono: ligeira redução comparada ao verão, mantendo condições relativamente favoráveis (referência: 606 h; cenário 1: 650 h; cenário 2: 422 h; cenário 3: 174 h).

Essa avaliação sazonal evidencia que a operação e manutenção do WEC devem priorizar os meses de primavera e verão, enquanto o inverno representa períodos críticos que exigem maior atenção e flexibilidade operacional.

A análise da persistência das condições de inacessibilidade revelou informações estratégicas para o planejamento de O&M. No inverno, para eventos com duração de três dias ou menos, a probabilidade acumulada foi: cenário 3: 62%, cenário 2: 76%, referência: 86%, cenário 1: 92%. Ao fixar a probabilidade acumulada em 95%, os dias de inacessibilidade correspondentes foram: cenário 1: ≤ 4 dias, Gray: 5 dias, cenário 2: 10 dias, cenário 3: 35 dias.

Durante a primavera, verificou-se aumento da acessibilidade e redução da persistência de eventos, enquanto o verão apresentou as maiores durações de acessibilidade e menor probabilidade de inacessibilidade prolongada. No outono, os padrões foram intermediários,

Conclusão

com melhor desempenho do cenário 1 e do cenário de referência em comparação aos cenários 2 e 3. Estes dados permitem planejar períodos críticos de manutenção preventiva, garantindo que recursos humanos e logísticos sejam alocados de forma eficiente.

A comparação entre os quatro cenários evidencia claramente a influência dos critérios de acessibilidade na operação do WEC:

- Cenário de referência (Gray, 2015): ligeiramente mais restritivo, apresenta boa acessibilidade, mas maior dispersão nas janelas de manutenção;
- Cenário 1: mais robusto, alto grau de previsibilidade e acessibilidade, menor fragmentação de janelas, ideal para planejamento seguro de O&M;
- Cenário 2: permissivo, fragmentação elevada das janelas, maior número de oportunidades curtas, requer planejamento flexível;
- Cenário 3: restritivo, baixa acessibilidade, longos períodos de inacessibilidade, adequado apenas para análise conservativa ou planejamento de emergência.

Essa análise reforça que a escolha de critérios operacionais impacta diretamente o número de dias acessíveis, o número de janelas, a fragmentação das oportunidades e a capacidade de planejar O&M de forma eficiente.

Os resultados fornecem subsídios importantes para o planejamento operacional e estratégico:

- Definição de períodos ideais para manutenção preventiva e corretiva;
- Alocação eficiente de recursos humanos e logísticos;
- Planejamento de segurança e mitigação de riscos durante períodos críticos de inacessibilidade;
- Orientação para investimentos em tecnologias complementares, redundâncias e estratégias de operação durante períodos de mar mais energético.

Em suma, este estudo fornece uma base sólida para o planejamento da operação e manutenção do WEC REEFS, considerando:

- Avaliação histórica detalhada da acessibilidade (81 anos);
- Comparação de quatro cenários de critérios de operação;
- Análise mensal, sazonal e anual da acessibilidade e da fragmentação das janelas;
- Persistência e probabilidade de eventos de inacessibilidade;
- Orientações estratégicas para maximizar eficiência operacional;
- Contextualização do potencial da energia das ondas e custos associados.

Além disso, os dados reforçam a viabilidade técnica do WEC no Porto de Sines, considerando o alto grau de acessibilidade observado em cenários mais permissivos, o que maximiza a eficiência da operação e a utilização do recurso marinho.

5.2. Limitações e trabalhos futuros

Apesar dos avanços proporcionados por este estudo, algumas limitações devem ser destacadas, as quais abrem espaço para trabalhos futuros:

- Integração do recurso energético com a operacionalidade: é recomendada a correlação entre o potencial energético do Porto de Sines e as janelas de manutenção identificadas. Essa abordagem permitiria uma avaliação conjunta entre o aproveitamento do recurso e a disponibilidade operacional do WEC, fornecendo uma visão mais completa da sua viabilidade técnica.
- Incorporação de parâmetros meteorológicos adicionais: sugere-se incluir variáveis como a velocidade e a direção do vento (também disponíveis no ERA5), de modo a refinar a estimativa das condições operacionais e a robustez dos critérios de acessibilidade.
- Análise económica integrada: propõe-se correlacionar os custos de manutenção com as janelas de operação, considerando o desempenho de diferentes tipos de embarcações e a possibilidade de acesso aéreo. Essa abordagem permitirá avaliar a viabilidade económica das intervenções com maior rigor.
- Adoção do parâmetro T_e como critério operacional: a inclusão do período de energia (T_e) no processo de definição das janelas de manutenção poderá conferir maior precisão à avaliação das condições de navegabilidade e segurança das embarcações.
- Expansão geográfica e temporal da análise: futuros trabalhos poderão aplicar a mesma metodologia a outros locais da costa portuguesa e considerar cenários climáticos futuros, permitindo estimar a resiliência do WEC face a possíveis alterações nas condições de agitação marítima.

Em conjunto, estas propostas têm o potencial de enriquecer as análises de acessibilidade, aumentar a fiabilidade dos resultados e contribuir para uma tomada de decisão mais fundamentada no planeamento de O&M de conversores de energia das ondas.

Conclusão

Referências

Ahmed, T. M., Bassiouny, A. R., Geba, K. A., & Welaya, Y. (2023). Optimisation of a multi-body three floats wave energy converter in irregular waves. *Journal of Marine Science and Application*, 22(3), 475–487.

Aderinto, T., & Li, H. (2018). Ocean wave energy converters: Status and challenges. *Energies*, 11(5), 1250.

Ahn, S. (2021). Modeling mean relation between peak period and energy period of ocean surface wave systems. *Ocean Engineering*, 228, 108937.

Ahn, S., & Neary, V. S. (2020). Non-stationary historical trends in wave energy climate for coastal waters of the United States. *Ocean Engineering*, 216, 108044.

Androniceanu, A., & Sabie, O. M. (2022). Overview of green energy as a real strategic option for sustainable development. *Energies*, 15(22), 8573.

Anastas, G., Santos, J. A., Fortes, C. J. E. M., & Pinheiro, L. V. (2022). Energy assessment of potential locations for OWC instalation at the Portuguese coast. *Renewable Energy*, 200, 37–47.

Aqua-RET Project. (2012). Download Images and Illustrations. Aqua-RET. Retrieved October 20, 2025, from http://www.aquaret.com/indexea3d.html?option=com_content&view=article&id=203&Itemid=344&lang=en#Animations

Astariz, S., Vazquez, A., & Iglesias, G. (2015). Evaluation and comparison of the levelized cost of tidal, wave, and offshore wind energy. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 7(5).

Beirão, P., & Valério, D. (2015). Numerical comparison between deep water and intermediate water depth expressions applied to a wave energy converter. *AIMS Energy*, 3(4).

Bozzi, S., Besio, G., & Passoni, G. (2018). Wave power technologies for the Mediterranean offshore: Scaling and performance analysis. *Coastal Engineering*, 136, 130–146.

Castro-Santos, L., Silva, D., Bento, A. R., Salvação, N., & Guedes Soares, C. (2018). Economic feasibility of wave energy farms in Portugal. *Energies*, 11(11), 3149.

Referências

- Clemente, D., Rosa-Santos, P., Ferradosa, T., & Taveira-Pinto, F. (2023). Wave energy conversion energizing offshore aquaculture: Prospects along the Portuguese coastline. *Renewable Energy*, 204, 347-358.
- Comissão Europeia. (2019). Pacto Ecológico Europeu [Comunicação ao Parlamento Europeu, ao Conselho Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões]. COM(2019) 640 final.
- Cornett, A. M. (2008, July). A global wave energy resource assessment. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. ISOPE-I). ISOPE.
- De Almeida, J. L. (2017). REEFS: An artificial reef for wave energy harnessing and shore protection—A new concept towards multipurpose sustainable solutions. *Renewable Energy*, 114, 817–829.
- De Almeida, J. L., & Martinho, M. S. (2020). Experimental evaluation of the shore protection potential of the novel REEFS wave energy converter. *Ocean Engineering*, 217, 107918.
- De Andrés, A. D., Guanche, R., Vidal, C., & Losada, Í. J. (2015, May). Location Targeting for Wave Energy Deployment From an Operation and Maintenance Perspective. In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (Vol. 56574, p. V009T09A025). American Society of Mechanical Engineers.
- Direção-Geral de Energia e Geologia. (2025). *Energia em números: Edição 2025*.
- Dos Santos, A. N. (2023). Variabilidade inter- e intra-anual da energia das ondas da costa portuguesa e brasileira: uma perspetiva de implementação do conversor nearshore REEFS. (Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto). Porto, Portugal.
- Farrok, O., Ahmed, K., Tahlil, A. D., Farah, M. M., Kiran, M. R., & Islam, M. R. (2020). Electrical power generation from the oceanic wave for sustainable advancement in renewable energy technologies. *Sustainability*, 12(6), 2178.
- Ferreira, M. M., Santos, J. A., da Silva, L. R., Abrahao, R., Gomes, F. D. S. V., & Braz, H. D. M. (2023). A new index to evaluate renewable energy potential: A case study on solar, wind and hybrid generation in Northeast Brazil. *Renewable Energy*, 217, 119182.
- Fontán-Bouzas, Á., Abreu, T., C. Ferreira, C., Silva, P. A., López-Olmedilla, L., Guitián, J., ... & Alcántara-Carrió, J. (2024). Morphodynamic response of open and embayed beaches to winter conditions: two case studies from the North Atlantic Iberian coast. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1), 168.
- Gang, A., Guo, B., Hu, Z., & Hu, R. (2022). Performance analysis of a coast–OWC wave energy converter integrated system. *Applied Energy*, 311, 118605.
- Giannini, G., Rosa-Santos, P., Ramos, V., & Taveira-Pinto, F. (2020). On the development of an offshore version of the CECO wave energy converter. *Energies*, 13(5), 1036.

Referências

- Giannini, G., Zavvar, E., Ramos, V., Calheiros-Cabral, T., Iglesias, I., Taveira-Pinto, F., & Rosa-Santos, P. (2024). On the development of a near-shore pivoting wave energy converter. *Energies*, 17(11), 2695.
- Gintautas, T., & Sørensen, J. D. (2017). Improved methodology of weather window prediction for offshore operations based on probabilities of operation failure. *Journal of Marine Science and Engineering*, 5(2), 20.
- Gonzalez, P. M., Baldwin, E. M., Stratigaki, V., Troch, P., & Moreno, E. C. (2023, September). A Multi-PTO Wave Energy Converter for Low Energetic Seas: Ensenada Bay Case. In *Proceedings of the European Wave and Tidal Energy Conference (Vol. 15)*.
- Gray, A., Dickens, B., Bruce, T., Ashton, I., & Johannning, L. (2017). Reliability and O&M sensitivity analysis as a consequence of site specific characteristics for wave energy converters. *Ocean Engineering*, 141, 493–511.
- Gray, A., Johannning, L., & Dickens, B. (2015). A Markov chain model to enhance the weather simulation capabilities of an operations and maintenance tool for a wave energy array.
- Jalón, M. L., Chiachio, J., & Chiachio, M. (2023). An assessment of the trade-off between energetic efficiency and structural integrity in Wave Energy Converters.
- Jacobsen, H. K., Koch, P. A. H., & Wolter, C. (2016). Nearshore versus offshore: comparative cost and competitive advantages. In *IAEE Energy Forum (No. Bergen Special 2016, pp. 17–19)*.
- Johannesson, P., Lang, X., Johnson, E., & Ringsberg, J. W. (2022). Mechanical reliability analysis of flexible power cables for marine energy. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(6), 716.
- Kocak, E., Ulug, E. E., & Oralhan, B. (2023). The impact of electricity from renewable and non-renewable sources on energy poverty and greenhouse gas emissions (GHGs): Empirical evidence and policy implications. *Energy*, 272, 127125.
- Majidi, A. G., Ramos, V., Rosa-Santos, P., das Neves, L., & Taveira-Pinto, F. (2025). Power production assessment of wave energy converters in mainland Portugal. *Renewable Energy*, 243, 122540.
- Moore, D., Eftekhari, A., & Nash, S. (2024). Weather window analysis for the deployment, operation, and maintenance of marine renewable energy devices in Irish coastal waters. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 1–19.
- Mortazavizadeh, S. A., Yazdanpanah, R., Gaona, D. C., & Anaya-Lara, O. (2023). Fault diagnosis and condition monitoring in wave energy converters: a review. *Energies*, 16(19), 6777.
- Neill, S. P., Haas, K. A., Thiébot, J., & Yang, Z. (2021). A review of tidal energy—Resource, feedbacks, and environmental interactions. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 13(6).
- O'Connor, M., Burke, D., Curtin, T., Lewis, T., & Dalton, G. (2012, October). Weather windows analysis incorporating wave height, wave period, wind speed and tidal current with relevance

Referências

to deployment and maintenance of marine renewables. In 4th International Conference on Ocean Energy (Vol. 17, pp. 1–9).

Olauson, J. (2018). ERA5: The new champion of wind power modelling. *Renewable Energy*, 126, 322–331.

Onea, F., Rusu, L., Carp, G. B., & Rusu, E. (2021). Wave farms impact on the coastal processes—a case study area in the Portuguese nearshore. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(3), 262.

Pastor, J., & Liu, Y. (2016). Wave climate resource analysis based on a revised gamma spectrum for wave energy conversion technology. *Sustainability*, 8(12), 1321.

Paterson, J., D’amico, F., Thies, P. R., Kurt, R. E., & Harrison, G. (2018). Offshore wind installation vessels—A comparative assessment for UK offshore rounds 1 and 2. *Ocean Engineering*, 148, 637–649.

Pradhan, P., Kishore, S., & Defourny, B. (2018). Optimal predictive maintenance policy for an ocean wave farm. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10(4), 1993–2004.

Ren, Z., Verma, A. S., Li, Y., Teuwen, J. J., & Jiang, Z. (2021). Offshore wind turbine operations and maintenance: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 110886.

Ribeiro, A. S., deCastro, M., Rusu, L., Bernardino, M., Dias, J. M., & Gomez-Gesteira, M. (2020). Evaluating the future efficiency of wave energy converters along the NW coast of the Iberian Peninsula. *Energies*, 13(14), 3563.

Rönkkö, J., Khosravi, A., & Syri, S. (2023). Techno-economic assessment of a hybrid offshore wind–wave farm: case study in Norway. *Energies*, 16(11), 4316.

Shadmani, A., Nikoo, M. R., Al-Raoush, R. I., Alamdari, N., & Gandomi, A. H. (2022). The optimal configuration of wave energy conversions respective to the nearshore wave energy potential. *Energies*, 15(20), 7734.

Silva, K., Abreu, T., & Oliveira, T. C. (2022). Inter-and intra-annual variability of wave energy in Northern mainland Portugal: Application to the HiWave-5 project. *Energy Reports*, 8, 6411–6422.

United Nations. (2016). Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015.

Waters, R. (2008). Energy from ocean waves: Full scale experimental verification of a wave energy converter (Doctoral dissertation, Uppsala University). *Acta Universitatis Upsaliensis. Digital comprehensive summaries of Uppsala dissertations from the Faculty of Science and Technology* (Vol. 580).

Yang, S., Zhang, C., Du, Z., Tu, Y., Dai, X., Huang, Y., ... & Wang, Z. L. (2024). Fluid Oscillation-Driven Bi-Directional Air Turbine Triboelectric Nanogenerator for Ocean Wave Energy Harvesting. *Advanced Energy Materials*, 14(12), 2304184.

Referências

Yang, S. H., Ringsberg, J. W., & Johnson, E. (2020). Wave energy converters in array configurations—Influence of interaction effects on the power performance and fatigue of mooring lines. *Ocean Engineering*, 211, 107294.

Yahaya, U., Chenvidhya, D., Sangpongsanont, Y., Muenpinij, B., & Chenvidhya, T. (2025). Simulation of photovoltaic power output using ERA5 reanalysis dataset validated with high-resolution observational measurements. *Japanese Journal of Applied Physics*, 64(5), 05SP22.

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: Felipe Roth

ISEP, Porto, 14 de setembro de 2025