



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Ricardo Filipe Martins Peredo

Validação do modelo Delft3D com recurso a dados IN-SITU

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares
Navais, na especialidade de Marinha**



Alfeite

2022



ESCOLA NAVAL

la sainte & biffaire



Ricardo Filipe Martins Peredo

Validação do modelo Delft3D com recurso a dados IN-SITU

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais,
na especialidade de Marinha

Orientação de: Doutor José Paulo dos Santos Ferreira Pinto

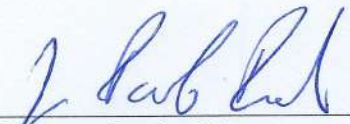
Coorientação de: Dra. Margarida Cortes Nobre Alves

Professor Doutor Ricardo Pinto Moura

O Aluno Mestrando

O Orientador


ASPOF M Martins Peredo


Doutor Paulo Pinto

Alfeite

2022

*“A person who never made a mistake
never tried anything new”*

Albert Einstein

Agradecimentos

A realização deste trabalho marca o final de uma das etapas mais marcantes da minha vida. Quero desta forma, começar por agradecer a todos os que em algum momento contribuíram para o meu desenvolvimento intelectual e humano.

Este estudo não seria exequível sem o acompanhamento cuidado e necessário do Professor Doutor Paulo Pinto. Quero agradecer-lhe por toda a partilha de conhecimento, orientação e disponibilidade.

Também dirijo um agradecimento especial à Dra. Margarida Alves pelo seu acompanhamento e pela sua disponibilidade inalcançável durante a realização de todo o trabalho.

Ao Professor Doutor Ricardo Moura quero agradecer pela sua ajuda no trabalho e pela confiança depositada.

Não quero deixar de agradecer a todos os docentes e guarnição da Escola Naval que me acompanharam durante o meu percurso nos últimos 5 anos.

A toda, a minha família em especial aos meus pais pelo seu apoio e pelo exemplo de força, trabalho e resiliência. À minha irmã pelo seu apoio e contributo para o meu crescimento pessoal.

À minha namorada por ser o meu porto de abrigo, por todo o seu apoio e carinho.

E por fim, ao curso Fernando Amor Monteiro de Barros, por todos os momentos e vivências partilhadas nos últimos cinco anos.

Resumo

No âmbito do projeto SAGA (Sistema de Apoio à Gestão Portuária) surgiu o interesse de implementar um modelo de circulação costeira (*Delft3D-WAVE*) com o principal objetivo de desenvolver um serviço operacional de previsão das condições meteo-oceanográficas, contribuindo para a avaliação diária da praticabilidade das barras da responsabilidade da Autoridade Marítima Nacional.

Para que a aplicação do modelo seja fiável é necessário que os resultados produzidos pelo mesmo transmitam um elevado nível de confiança. Deste modo, procedeu-se à comparação entre os dados registados pelas boias pertencentes à rede de observação sistemática do Instituto Hidrográfico, fundeadas ao longo da costa portuguesa, com os dados calculados pelo modelo nos pontos das malhas mais próximos das respetivas estações.

Assim, o presente trabalho consistiu na validação das condições de forçamento do modulo de agitação marítima do modelo *Delft3D*, correspondentes às soluções obtidas pelo modelo *WWIII*, para aplicação às áreas portuárias de Portugal Continental. Como objeto de estudo foram observadas três plataformas no processo de validação: a boia costeira de Leixões, a boia costeira da Nazaré e a boia oceânica de Faro, cujos parâmetros de caracterização da onda registados serão comparados aos calculados pelo modelo, através de parâmetros estatísticos, com o intuito de quantificar a precisão do mesmo.

Os resultados indicaram uma ligeira tendência de subestimação dos parâmetros da onda, identificando-se uma boa performance do modelo na previsão dos estados do mar mais moderados. Por outro lado, denotou-se o aumento do erro nas previsões dos fenómenos mais energéticos, justificado pela insuficiente resolução temporal e espacial dos campos de vento usados no forçamento das condições de fronteira do modelo *Delft3D*, que resulta na suavização da solução numérica.

Palavras-chave: Áreas portuárias, Boias da rede de observação sistemática do IH, Comparação, Modelo de circulação costeira, Precisão do modelo.

Abstract

Within the scope of the SAGA project (Sistema de Apoio à Gestão Portuária) the interest arose to implement a coastal circulation model (Delft3D-WAVE) with the main objective of developing an operational service for forecasting meteo-oceanographic conditions, contributing to the daily assessment of the practicability of bars, which is the responsibility of the National Maritime Authority.

In order for the application of the model to be reliable, it is necessary that the results produced by the model convey a high level of confidence. Thus, we compared the data recorded by the buoys belonging to the systematic observation network of the Hydrographic Institute, anchored along the portuguese coast, with the data calculated by the model at the points closest to the respective stations.

Thus, this work consisted in the validation of the forcing conditions of the wave modulus of the Delft3D model, corresponding to the solutions obtained by the WWIII model, for application to the port areas of mainland Portugal. As study object, three platforms were observed in the validation process, the coastal buoy of Leixões, the coastal buoy of Nazaré and the ocean buoy of Faro, whose wave characterization parameters recorded will be compared to those calculated by the model, through statistical parameters in order to quantify its accuracy.

The results show there was a slight tendency of underestimation of the wave parameters, identifying a good performance of the model in the prediction of the most moderate sea states. On the other hand, it was denoted the increase of error in the forecasts of more energetic phenomena, justified by the insufficient temporal and spatial resolution of the wind field used in forcing the boundary conditions of the Delft3D model, which results in the smoothing of the numerical solution.

Keywords: Harbour áreas, Buoys of the IH systematic observation network, Comparison, Coastal circulation model, Model accuracy.

Índice

Introdução	1
Revisão da Literatura.....	2
Estrutura do Trabalho	4
1. Dados e Métodos	7
1.1 Descrição dos Dados	7
1.1.1 Boias	7
1.1.2 Modelo numérico	11
1.2 Métodos estatísticos aplicados.....	14
1.3 Processamento de Dados	16
2. Análise de Resultados	19
2.1 Vila do Conde	20
2.2 Nazaré	31
2.3 Portimão	41
3. Discussão de Resultados	53
3.1 Comparação dos resultados com outros estudos.....	57
Conclusão	59
Referências bibliográficas	63
Apêndice A - Processo de obtenção do ficheiro dos dados do modelo	67
Apêndice B – Código da coluna de tempo e homogeneização temporal	69
Apêndice C – Código do gráfico da Altura Significativa em função do tempo ..	71
Apêndice D – Código do histograma polar da altura significativa na Nazaré ...	73
Apêndice E – Código dos diagramas de dispersão da altura significativa na Nazaré.....	75
Apêndice F – Código dos gráficos do NRMSE e do Bias da altura significativa na Nazaré.....	77

Lista de Figuras

Figura 1-1: Boias utilizadas neste estudo no mapa.	9
Figura 1-2: Esquema exterior da boia ondógrafo da marca Datawell.	10
Figura 1-3: Boia da marca Fugro.	11
Figura 1-4: Representação das malhas exterior (amarelo) e interior (verde) para Vila do Conde (Retirado de Madeira, 2021)	13
Figura 1-5: Representação das malhas exterior (amarelo) e interior (verde) para a Nazaré (Retirado de Madeira, 2021)	13
Figura 1-6: Representação das malhas exterior (amarelo) e interior (verde) para Portimão (Retirado de Madeira, 2021)	14
Figura 2-1: Comparação da altura significativa (H_s) entre os dados gerados pelo modelo e os dados observados pelas boias em Leixões, Nazaré e Faro.	20
Figura 2-2: Histograma polar do período de pico da ondulação registada pela boia de Leixões Costeira.	21
Figura 2-3: Histograma polar da H_s da ondulação registada pela boia de Leixões Costeira.	21
Figura 2-4: Diagrama de dispersão da altura significativa (H_s) entre os dados calculados pelo modelo e observados pela boia na costa de Leixões.	23
Figura 2-5: Diagrama de dispersão do período médio (T_{m02}) entre os dados calculados pelo modelo e observados pela boia na costa de Leixões.	24
Figura 2-6: Representação do <i>bias</i> da H_s em classes de H_s na costa de Leixões.	25
Figura 2-7: Representação do <i>NRMSE</i> da H_s em classes de H_s na costa de Leixões.	25
Figura 2-8: Representação do <i>bias</i> do T_{m02} em classes do T_{m02} na costa de Leixões.	26
Figura 2-9: Representação do <i>NRMSE</i> do T_{m02} em classes de T_{m02} na costa de Leixões.	27
Figura 2-10: Representação do <i>bias</i> do T_p em classes de T_p na costa de Leixões.	28
Figura 2-11: Representação do <i>NRMSE</i> do T_p em classes T_p na costa de Leixões.	28
Figura 2-12: Representação do <i>bias</i> da H_s em classes de direção na costa de	

Leixões.	29
Figura 2-13: Representação do <i>NRMSE</i> da <i>Hs</i> em classes de direção na costa de Leixões.	30
Figura 2-14: Representação do <i>bias</i> do <i>Tp</i> em classes de direção na costa de Leixões.	30
Figura 2-15: Representação do <i>NRMSE</i> do <i>Tp</i> em classes de direção na costa de Leixões.	31
Figura 2-16: Histograma polar do período de pico da ondulação registada pela boia da Nazaré Costeira.	32
Figura 2-17: Histograma polar da <i>Hs</i> da ondulação registada pela boia da Nazaré Costeira.	32
Figura 2-18: Diagrama de dispersão da altura significativa (<i>Hs</i>) entre os dados calculados pelo modelo e adquiridos pela boia na costa da Nazaré.	34
Figura 2-19: Diagrama de dispersão do período médio (<i>Tm02</i>) entre os dados calculados pelo modelo e recolhidos pela boia na costa da Nazaré.	34
Figura 2-20: Representação do <i>bias</i> da <i>Hs</i> em classes de <i>Hs</i> na costa da Nazaré.	35
Figura 2-21: Representação do <i>NRMSE</i> da <i>Hs</i> em classes <i>Hs</i> na costa da Nazaré.	36
Figura 2-22: Representação do <i>bias</i> do <i>Tm02</i> em classes de <i>Tm02</i> na costa da Nazaré.	37
Figura 2-23: Representação do <i>NRMSE</i> do <i>Tm02</i> em classes de <i>Tm02</i> na costa da Nazaré.	37
Figura 2-24: Representação do <i>bias</i> do <i>Tp</i> em classes de <i>Tp</i> na costa da Nazaré.	38
Figura 2-25: Representação do <i>NRMSE</i> do <i>Tp</i> em classes de <i>Tp</i> na costa da Nazaré.	38
Figura 2-26: Representação do <i>bias</i> da <i>Hs</i> em classes de direção na costa da Nazaré.	39
Figura 2-27: Representação do <i>NRMSE</i> da <i>Hs</i> em classes de direção na costa da Nazaré.	40
Figura 2-28: Representação do <i>bias</i> da <i>Tp</i> em classes de direção na costa da Nazaré.	40
Figura 2-29: Representação do <i>NRMSE</i> da <i>Tp</i> em classes de direção na costa da Nazaré.	41

Figura 2-30: Diagrama de dispersão da altura significativa (H_s) entre os dados calculados pelo modelo e recolhidos pela boia na costa de Faro.....	44
Figura 2-31: Diagrama de dispersão do período médio (T_{m02}) entre os dados calculados pelo modelo e recolhidos pela boia na costa de Faro.....	45
Figura 2-32: Representação do <i>bias</i> da H_s em classes de H_s na costa de Faro.	46
Figura 2-33: Representação do <i>NRMSE</i> da H_s em classes de H_s na costa de Faro.	46
Figura 2-34: Representação do <i>bias</i> do T_{m02} em classes de T_{m02} na costa de Faro.	47
Figura 2-35: Representação do <i>NRMSE</i> do T_{m02} em classes de T_{m02} na costa de Faro.	47
Figura 2-36: Representação do <i>bias</i> do T_p em classes de T_p na costa de Faro.	48
Figura 2-37: Representação do <i>NRMSE</i> do T_p em classes de T_p na costa de Faro.	49
Figura 2-38: Representação do <i>bias</i> da H_s em classes de direção na costa de Portimão.	50
Figura 2-39: Representação do <i>NRMSE</i> da H_s em classes de direção na costa de Portimão.	50
Figura 2-40: Representação do <i>bias</i> do T_p em classes de direção na costa de Portimão.	51
Figura 2-41: Representação do <i>NRMSE</i> do T_p em classes de direção na costa de Portimão.	51

Lista de Tabelas

Tabela 1-1: Localização geográfica e profundidade das boias utilizadas neste estudo.....	9
Tabela 1-2: Designação das direções.	18
Tabela 2-1: Estatísticas da costa de Leixões, comparação os dados gerados pelo modelo e os registados pela boia.....	21
Tabela 2-2: Correlação, raiz do erro quadrático e viés entre os dados gerados pelo modelo e as observações da boia, para todo o período em Leixões.	22
Tabela 2-3: Número de amostras das classes de H_s em Leixões.	24
Tabela 2-4: Número de amostras das classes de $Tm02$ em Leixões.....	26
Tabela 2-5: Número de amostras das classes de Tp em Leixões.....	27
Tabela 2-6: Número de registos por direção em Leixões.....	29
Tabela 2-7: Estatísticas da costa de Nazaré, comparação os dados gerados pelo modelo e os registados pela boia.....	32
Tabela 2-8: Correlação, raiz do erro quadrático e viés entre os dados gerados pelo modelo e as observações da boia, para todo o período em Nazaré.	33
Tabela 2-9: Número de amostras das classes de H_s na Nazaré.	35
Tabela 2-10: Número de amostras das classes de $Tm02$ na Nazaré.	36
Tabela 2-11: Número de amostras das classes de Tp na Nazaré.	37
Tabela 2-12: Número de registos por direção na Nazaré.	39
Tabela 2-13: Estatísticas da costa de Faro, comparação os dados gerados pelo modelo e os registados pela boia.....	43
Tabela 2-14: Correlação, raiz do erro quadrático e viés entre os dados gerados pelo modelo e as observações da boia, para todo o período em Faro.	43
Tabela 2-15: Número de amostras das classes de H_s em Faro.	45
Tabela 2-16: Número de amostras das classes de $Tm02$ em Faro.....	46
Tabela 2-17: Número de amostras das classes de Tp em Faro.....	48
Tabela 2-18: Número de registos por direção em Faro	49

Lista de equações

Fórmula 1: Viés, bias,.....	15
Fórmula 2: Média, $\bar{x}$,.....	15
Fórmula 3: Root mean square error, RMSE,	15
Fórmula 4: Normalized root mean square error, NRMSE,	15
Fórmula 5: Coeficiente de correlação, r ,.....	16
Fórmula 6: Desvio padrão, σ ,	16

Lista de siglas e acrónimos

E	Este
ECMWF	European Centre for Medium Range Weather Forecasting
ENE	Este-nordeste
ESE	Este-sudeste
GPS	Global Positioning System
HF	Alta frequência
Hs	Altura Significativa
IH	Instituto Hidrográfico
kg	quilogramas
m	Metros
N	Norte
netCDF	Network Common Data Form
NM	Milhas Náuticas
NNE	Nor-nordeste
NNW	Nor-noroeste
NRMSE	<i>Normalized Root Mean Square Error</i>
NW	Noroeste
PkDir	Direção de Pico
r	Coeficiente de correlação de <i>Pearson</i>
RMSE	Raiz do erro quadrático médio
s	Segundos
S	Sul
SAGA	Sistema de Apoio à Gestão Portuária
SE	Sudeste
σ	Desvio padrão
SIMOCEAN	Systems for Integrated Monitoring of the Ocean
SSE	Su-sudeste
SSW	Su-sudoeste

SW	Sudoeste
SWAN	Simulating Waves Nearshore
Tm02	Período médio
Tp	Período de Pico
W	Oeste
WNW	Oeste-noroeste
WSW	Oeste-sudoeste
WWIII	WAVEWATCH III

Introdução

No âmbito do projeto SAGA (Sistema de Apoio à Gestão Portuária), incluído no domínio da Vigilância Marítima Integrada e coordenado pelo Programa Operacional Mar 2020, verifica-se a intenção de desenvolver um serviço operacional de apoio à decisão na avaliação da praticabilidade das barras portuárias. O propósito dessa ferramenta era identificar as situações condicionantes e inibidoras da navegação na entrada e saída dos portos. Na sua base está presente a relação das tomadas de decisão dos Capitães de Porto e as condições ambientais na génese dos seus juízos, nomeadamente as condições meteorológicas, a agitação marítima e a corrente de maré (Madeira et al., 2019).

O desenvolvimento desta ferramenta foi inicialmente realizado no projeto SIMOCEAN (*Systems for Integrated Monitoring of the Ocean*) e a sua operacionalidade testada nos portos de Viana do Castelo, Póvoa de Varzim, Aveiro e Figueira da Foz. Com base numa rede neuronal que estabelece uma relação de verosimilhança entre as decisões do Capitão de Porto e as condições de agitação marítima oriundas de um modelo de alta resolução, são criados avisos diários sobre a navegabilidade das barras. Após este desenvolvimento, surgiu o interesse de atualizar a metodologia através da aplicação de um modelo de circulação costeira, o *Delft3D-WAVE*, com a finalidade de alargar a aplicação a outros portos e de incluir a corrente de maré na simulação das condições de mar (Madeira et al., 2019). Este projeto resultou na implementação do módulo do modelo *Delft3D*, responsável pelo cálculo da agitação marítima, nas áreas dos portos de Vila do Conde, Nazaré e Portimão (Madeira et al., 2019).

Portugal, sendo um país possuidor de uma vasta linha costeira torna-se, inerentemente, associado a uma elevada atividade marítima. Deste modo, é necessário que esta potencialidade, proporcionada pela posição geográfica privilegiada, seja usufruída com a máxima segurança. Ambos os projetos inseriram-se num conjunto de esforços desenvolvidos para a criação desta ferramenta de apoio à decisão relativa à praticabilidade das barras baseada na utilização do modelo *Delft3d-WAVE*.

Assim sendo, esta tese tem por objetivo validar os cálculos dos parâmetros de agitação marítima, realizados nas regiões de fronteira do modelo *Delft3D*, correspondentes às condições de forçamento induzidas pelo modelo *WWIII* (*Wavewatch III*).

Revisão da Literatura

Neste subcapítulo, serão referenciados estudos relacionados com a avaliação e validação de modelos bem como a caracterização da agitação marítima na costa portuguesa, com o intuito de identificar o desempenho geral de um modelo espectral de terceira geração e compreender os melhores métodos para a sua validação.

Os modelos podem definir-se como ferramentas desenvolvidas com o propósito de prever ou comparar os resultados de um sistema novo ou sob condições dinâmicas. Em ambos os casos, o objetivo final do processo de validação é perceber se o modelo desenvolvido possui um desempenho considerado suficiente para ser utilizado no âmbito em que se propõe. Deste modo, destaca-se o facto de um modelo nunca poder ser validado a 100%, uma vez que este é uma aproximação de um sistema e a sua validação constitui uma série de tarefas que permitem confirmar a sua performance adaptada ao grau das suas necessidades (Carson, 2002).

Modelos matemáticos são considerados ferramentas essenciais para o estudo e análise de sistemas complexos. Estes apresentam várias vantagens como por exemplo: permitem a visualização de conceitos abstratos; possibilitam a representação de sistemas de dimensões extremas; realizam e testam previsões, podendo ser utilizados para explicar teorias científicas; permitem a realização de testes mais seguros, rápidos e menos dispendiosos. Não obstante as várias vantagens, modelos também apresentam algumas limitações relacionadas com o limite de detalhe, com as aproximações introduzidas e com o equilíbrio necessário entre a precisão e a simplicidade. No que diz respeito à utilização de modelos costeiros podemos destacar as suas capacidades de previsão alicerçadas à cobertura espacial considerável de ótimas resoluções. No entanto, assim como foi referido genericamente para os modelos, também os modelos de circulação costeira não estão isentos de erros (Texas Education Agency, n.d).

“O modelo *Delft3D* é um modelo computacional desenvolvido para uma abordagem multidisciplinar da ondulação costeira e modelação morfodinâmica” (Gil, 2014, p.5). É constituído por vários módulos responsáveis pela simulação de diferentes fenómenos como a corrente, agitação marítima, transporte de sedimentos e qualidade da água. Neste trabalho o módulo em análise é o *Wave*. Este é empregue como forçador das ondas e recorre ao modelo espectral de terceira geração *SWAN* (*Simulating Waves Nearshore*) para a simulação da agitação marítima (Gil, 2014; Madeira, 2021).

Os modelos de ondas, como por exemplo o *SWAN* de terceira geração, são uma ferramenta que geram o espectro e permitem a sua propagação baseando-se no conhecimento das condições de fronteira, velocidade do vento, batimetria e correntes. Com recurso a este conjunto de dados, os modelos têm o objetivo de produzir uma previsão fiável da agitação marítima em quaisquer condições (Faria, 2009).

Segundo Fernandes (2020), para a validação de um modelo de agitação marítima é necessário recorrer a algumas estatísticas produzidas pelo mesmo como a *Hs* (altura significativa), o *Tm02* (período médio), o *Tp* (período de pico) e a respetiva direção associada. Por conseguinte, são realizadas comparações e aplicados parâmetros estatísticos usados regularmente no processo de validação tal como o *bias*, a raiz do erro quadrático médio (*RMSE*), o coeficiente de correlação e o declive da reta de regressão linear (Lo Re et al., 2019).

Relativamente ao processo de validação dos modelos e contrapondo os métodos usualmente utilizados, Mentaschi et al. (2013) desenvolveram um estudo relativo aos problemas da utilização da *RMSE* e de outros indicadores derivados, como por exemplo o *Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)*, para a avaliação da fiabilidade dos dados produzidos por simulações numéricas. No seu trabalho identificaram que em situações onde o *r* (coeficiente de correlação) se mantém constante, os valores do *RMSE* tendem a ser menores, identificando erradamente desempenhos superiores, em simulações onde se verifica *bias* negativo.

A importância da previsão da agitação marítima é mundialmente reconhecida e, deste modo, são realizados diversos estudos de implementação e validação de modelos espectrais de terceira geração. Um destes estudos foi desenvolvido por Mentaschi et al. (2015), onde avaliaram a performance do modelo *WWIII* no Mar Mediterrâneo e verificaram uma tendência geral de sobrestimação da *Hs* em condições calmas ou moderadas. Em contrapartida, o modelo apresentava tendências de subestimação em condições mais energéticas. As tendências verificadas sugeriam a necessidade da recalibração do modelo tendo em conta as condições locais modeladas.

Na costa oeste portuguesa, em média, verifica-se ondulação proveniente dos quadrantes de noroeste (NW) com *Hs* compreendida entre 2 metros (m) e 2,5 m e períodos entre 9 segundos (s) a 11 s, geradas por ventos de altas latitudes no Atlântico Norte. A costa sul portuguesa, também denominada por costa algarvia, encontra-se abrigada da agitação marítima proveniente dos setores de N (Norte) e NW resultando um regime de baixa energia marcado principalmente pela vaga de geração local. As

médias anuais de *Hs* e *Tm02* são de 0,9 m e 6-11 s, respetivamente (Andrade et al., 2006; Faria, 2009).

Com o intuito de caracterizar as condições de agitação marítima da costa portuguesa, Costa et al. (2001) compilaram toda a informação registada pelas estações da Figueira da Foz, Sines e Faro desde 1980. Na costa Oeste (W), verifica-se ondulação maioritariamente do setor de NW, sendo os valores de *Hs* mais frequentes entre 1 m e 2 m, *Tm02* mais frequente de 5 s a 7 s e *Tp* situado maioritariamente entre 9 s e 13 s. Na costa algarvia, a direção predominante da ondulação é W-SW (oeste / sudoeste), perfazendo 73% das ocorrências registadas, com *Hs* maioritariamente inferior a 1 m e *Tm02* de 5 s. Os restantes fenómenos registados correspondem na sua maioria a condições de levante, vaga de períodos curtos gerada por ventos provenientes do SE (Sudeste) Mediterrâneo (Nicolau et al., 2021).

Os fenómenos e tendências identificadas em grandes áreas podem não se manifestar em regiões menores inseridas na mesma. Deste modo, Almeida et al. (2011) realizaram um estudo que analisa e compara as tendências de tempestades para o Atlântico Norte com a costa sul portuguesa. Recorrendo a dados calculados por modelos de terceira geração, *SWAN* e *WWIII*, procedeu-se à validação dos dados tendo sido identificada uma tendência de subestimação da *Hs*.

Como é possível verificar no trabalho de Ribeiro et al. (2009), a validação dos modelos de agitação marítima, surge no âmbito do desenvolvimento de sistemas operacionais de previsão, basilares em sistemas de apoio à navegação e gestão de riscos associados. Os modelos quando implementados na escala adequada poderão ter várias utilidades. Com este objetivo a *Hidromod*, especialista em modelação, implementou um sistema de previsão de agitação marítima na costa portuguesa, suportado pelos modelos *WWIII* e *SWAN*. Este sistema inclui subdomínios de grande resolução responsáveis pelo alerta de situações de bloqueio com algas da central térmica de Sines e fornece informação detalhada da agitação marítima nos canais de acesso aos portos de Lisboa e Setúbal.

Estrutura do Trabalho

Este estudo está organizado em cinco capítulos, sendo o primeiro e o último, referentes à introdução e conclusão do trabalho, respetivamente, não estando ambos numerados. A introdução inicia-se pela explicação da problemática que motivou o

desenvolvimento deste trabalho e o âmbito em que se insere, de seguida são mencionados alguns estudos publicados no âmbito da caracterização da agitação marítima e da modelação e respetiva validação. O capítulo 1 – Dados e métodos – está dividido em três subcapítulos, sendo que no primeiro é realizada uma apresentação sumária dos equipamentos usados na aquisição de dados, onde é efetuada uma explicação sucinta das boias e do modelo assim como o processo de observação e estimação dos registos. Em seguida, são apresentados os métodos estatísticos aplicados no decorrer do estudo e no terceiro subcapítulo é descrito todo o processo de tratamento de dados até à realização das comparações e produção de gráficos. O capítulo 2 – Análise de Resultados – são apresentados e analisados os dados e as comparações produzidas através das informações registadas pelas boias e pelo modelo. No capítulo 3 – Discussão dos Resultados – são debatidos os resultados obtidos e são realizadas comparações com outros trabalhos. No último capítulo – Conclusão – são apresentadas as conclusões do trabalho, e são feitas sugestões de soluções para melhorar o desempenho do modelo e de trabalhos futuros.

1. Dados e Métodos

Este capítulo está dividido em três subcapítulos. Os subcapítulos contemplam: uma descrição sumária dos equipamentos usados para aquisição dos dados observados e uma breve descrição da implementação do modelo numérico considerado neste estudo de validação – *Delft3D* –; a apresentação dos métodos estatísticos empregues na análise e comparação dos dados; uma breve explicação do processo de tratamento dos dados e os métodos utilizados nas comparações efetuadas.

1.1 Descrição dos Dados

Os dados manipulados neste estudo têm origem em duas fontes diferentes: os dados observados foram adquiridos por boias fundeadas ao longo da costa portuguesa e os dados simulados que se pretende validar são calculados pelo modelo numérico *WWIII*. O modelo *WWIII* é responsável pelo cálculo dos parâmetros de agitação marítima, nas regiões de fronteira do modelo *Delft3D*.

1.1.1 Boias

Boias ondógrafo, são boias responsáveis pela medição das características da ondulação. Estas possuem um conjunto de sensores que lhes permite medir a aceleração vertical do movimento da superfície livre do mar indicando a altura e período das ondas, a direção de propagação e a temperatura da água à superfície (IH, n.d).

Após o processo de aquisição de dados realizada pelas boias ondógrafo, estes são transmitidos via rádio para uma estação recetora localizada em terra. Na estação recetora os dados são recebidos e decodificados para que possam ser processados e, por conseguinte, serem realizados os cálculos dos parâmetros mais representativos da ondulação. Nestas estações, existe ainda um computador que controla a aquisição de dados e um *software* responsável por um controlo de qualidade em tempo real dos dados adquiridos. O conjunto constituído pela boia ondógrafo e pela estação recetora designa-se por estação ondógrafo (IH, n.d).

Por último, os dados são transmitidos por *modem*, para a sede do Instituto Hidrográfico (IH). No IH os dados são novamente sujeitos a um controlo de qualidade, sendo este mais rigoroso, processados e armazenados nas respetivas bases de dados (IH, n.d).

O processo de aquisição de dados, empregue pelas boias em estudo, é efetuado

com um intervalo de digitalização de 0,78125 s e a sua gravação é realizada continuamente, independentemente das condições verificadas no local. As condições de temporal caracterizam-se por um valor de H_s superior a 5 m na costa Oeste e superior a 3 m na costa Sul e na costa da Madeira (IH, n.d).

Os registos são constituídos por deslocamentos verticais e deslocamentos horizontais nos sentidos Norte-Sul e Este-Oeste. O processamento da informação contida nos registos permitirá o cálculo de vários parâmetros de agitação marítima. Neste trabalho os parâmetros tidos em conta na análise foram:

Altura significativa (H_s) (m) – Média do terço mais elevado das alturas de onda registadas durante o período de observação. Corresponde sensivelmente à apreciação visual da altura das ondas;

Período médio ($Tm02$) (s) – Média dos períodos observados durante o registo. Retrata o período típico das ondas registadas durante o período de observação;

Período de pico (Tp) (s) – Período correspondente à banda de frequência com o máximo valor de densidade espectral. Representa o período das ondas mais energéticas verificadas no registo; Sistemas de ondas gerados por vento local (vaga) têm valores menores de Tp relativamente aos sistemas de ondas gerados por sistemas meteorológicos distantes.

Direção de pico ($PkDir$) – Direção média associada ao período de pico. Caracteriza a direção de propagação das ondas com maiores períodos.

Deste modo, para a validação das condições de forçamento da agitação marítima do modelo *Delft3D*, foi utilizado um conjunto de dados obtidos a partir de três pontos de observação da rede sistemática do IH. Concretamente, foram utilizados os dados das boias de Leixões costeira, da Nazaré costeira e de Faro oceânica. As boias utilizadas são de duas tipologias, sendo a primeira mencionada da marca *Datawell* e as últimas duas da marca *Fugro*. A boia de Faro costeira seria melhor opção relativamente à boia de Faro oceânica para a validação do modelo, devido à sua menor distância à malha do modelo em Portimão, no entanto, devido à sua inatividade não existiam registos que contribuíssem para a validação do modelo.

As boias ondógrafo são equipamentos tecnológicos sujeitos a condições meteorológicas muitas vezes adversas, podendo sofrer danos que originem períodos de inoperacionalidade. O conjunto de dados das três boias usados neste estudo possuem

diferenças no número de registos para o período em análise. A boia de Leixões possui um total de 9677 registos compreendidos entre setembro de 2017 e novembro de 2019 distribuídos por 15 meses. A boia da Nazaré possui um total de 15420 registos compreendidos entre julho de 2017 e dezembro de 2019 cobrindo 23 meses. Por último, a boia de Faro adquiriu 22341 registos compreendidos num intervalo entre janeiro de 2018 e dezembro de 2020, distribuídos por um total de 33 meses. Na figura 1-1 pode observar-se a localização das boias utilizadas neste estudo. A tabela 1-1 apresenta a posição de fundeamento, constante nas cartas náuticas, e a profundidade correspondente de cada boia. Relativamente às condições de agitação, as boias de Leixões e Nazaré encontram-se em profundidades intermédias e a boia de Faro em águas profundas.

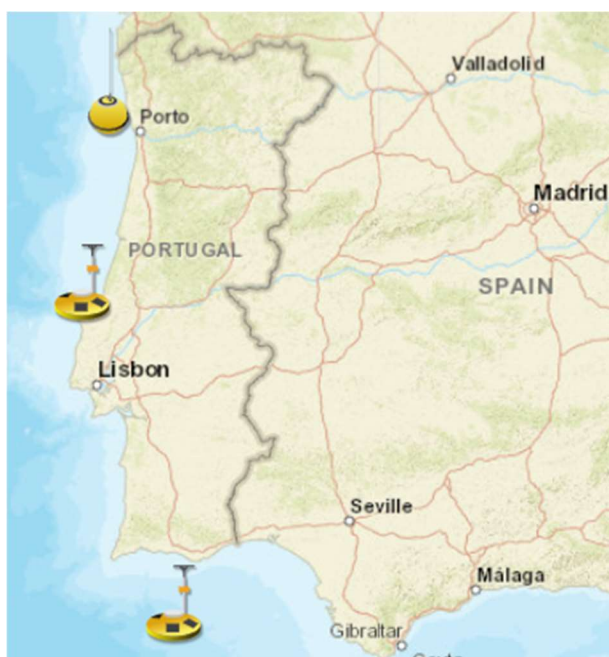


Figura 1-1: Boias em estudo.

Fonte: <https://www.hidrografico.pt/boias>

Tabela 1-1: Localização geográfica e profundidade das boias utilizadas neste estudo.

Localização	Latitude/Longitude	Profundidade (m)
Leixões Costeira	41°19.00' N/ 008°59.00' W	83
Nazaré Costeira	39°33.61' N/ 009°12.64' W	88
Faro Oceânica	36°23.90' N/ 008°04.10' W	1334

Durante os períodos de estudo, como já foi referido, existem descontinuidades temporais na aquisição de dados, originando ficheiros com lacunas. Estas lacunas

podem ser justificadas por períodos de manutenção, falhas na transmissão ou danos causados por condições mais energéticas.

As boias *Datawell* (Figura 1-2) dependendo do seu modelo e material constituinte, possuem um peso variável entre 110 quilogramas (Kg) e 270 Kg incluindo baterias, antenas e amarração. Podem ser divididas em duas partes, tendo em conta os seus componentes, sendo elas o casco e a cobertura da escotilha. No exterior do casco encontram-se o olhal de amarração, o sensor de temperatura e um para-choques. O interior é composto por vários compartimentos de baterias que rodeiam um compartimento de alumínio, que abriga o sensor responsável pela medição do movimento da boia. Na cobertura da escotilha pode ser observada a antena de alta frequência (*HF*), o recetor GPS (*Global Positioning System*), essencial em caso de deriva do equipamento, e a placa principal (Datawell BV, 2019).

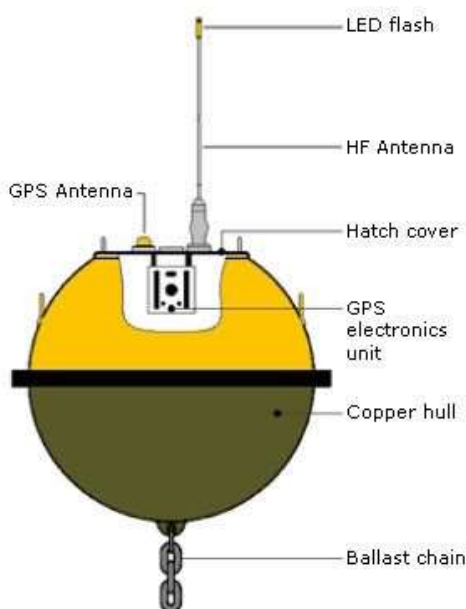


Figura 1-2: Esquema exterior da boia ondógrafo da marca Datawell.

Fonte: <https://www.qld.gov.au/environment/coasts-waterways/beach/monitoring/waves-glossary>

As boias *Wavescan Fugro* (Figura 1-3) têm um peso total de 924 Kg. São constituídas por inúmeros sensores responsáveis pela medição da temperatura do ar e da água, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento e parâmetros de agitação marítima. Na sua amarração também é possível colocar diversos sensores. A boia é constituída por um casco onde se encontram vários sensores e módulos elétricos e por um mastro equipado pela antena e pelos sensores meteorológicos. A alimentação é realizada através de painéis solares ou de baterias em dias de baixa radiação solar.

Este equipamento permite comunicações via satélite e rádio.



Figura 1-3: Boia da marca Fugro.

Fonte: <https://www.offshorewind.biz/2012/09/12/fugro-renewable-services-to-exhibit-in-husum-germany/>

1.1.2 Modelo numérico

O modelo numérico a validar é o *Delft3D*. Este pode ser definido como um modelo multidisciplinar constituído por vários módulos com diferentes finalidades. Neste trabalho o módulo em estudo foi o denominado por *Delft3D-WAVE*, responsável pelos registos da simulação da agitação marítima.

Neste estudo foram utilizados os cálculos realizados pelo modelo para as áreas de Vila do Conde, Nazaré e Portimão. Cada área é constituída por duas malhas regulares encaixadas com diferentes resoluções. O modelo necessita de condições de fronteira meteo-oceanográficas em cada uma das suas malhas. Na malha exterior, as condições de forçamento resultam das soluções obtidas pelo modelo *WWIII* para os parâmetros de onda com resolução espacial de $0,01^\circ$, tendo por sua vez este sido forçado pelos ventos provenientes do *European Centre for Medium Range Weather Forecasting* (ECMWF) com uma resolução espacial de $0,1^\circ$. Na fronteira da malha

interior, o forçamento de agitação marítima é introduzido com base na simulação efetuada na malha exterior. No que diz respeito ao forçamento da maré, esta é introduzida ao longo da malha exterior com recurso à previsão da maré astronómica. Na malha interior o forçamento decorre ao longo da sua fronteira pela agitação marítima, circulação e elevação estabelecida pela simulação da malha exterior (Madeira, 2021).

Nesta análise de validação são utilizados os dados de agitação marítima mais próximos das boias, simulados nas malhas exteriores. Apesar de apenas se validar as condições de forçamento do modelo *Delft3D*, é de salientar, que estas são estimadas com base num acoplamento entre ondas e correntes.

Nas figuras 1-4 a 1-6 está representado graficamente as áreas da malha exterior e interior do modelo em Vila do Conde, Nazaré e Portimão e também a posição aproximada do nó do modelo, cujos registos foram exportados, correspondente à posição mais próxima da respetiva boia. As boias e os nós selecionados do modelo encontram-se a diferentes distâncias nos portos em estudo, podendo este aspeto influenciar os resultados obtidos. Desta forma, nos portos da costa Oeste as distâncias verificadas são relativamente curtas, 4 milhas náuticas (NM) e 0,06 NM no porto de Leixões e Nazaré, respetivamente. Em Portimão, como já tinha sido referido, a boia cujos dados estavam disponíveis era a boia oceânica de Faro encontrando-se relativamente distante do modelo, aproximadamente 40 NM, e a ter uma influência considerável nos resultados obtidos.

No porto de Vila do Conde (Figura 1-4), a malha exterior possui como limites o ponto 41.399°N e 08.896°W e 41.284°N e 08.730°W, que corresponde a uma dimensão de 177,5 km² e uma resolução espacial de 460 x 423 m².

Para o cálculo da agitação marítima são utilizados como parâmetros de entrada a *Hs*, período e direção de pico e dispersão angular na direção da onda.



Figura 1-4: Representação das malhas exterior (amarelo) e interior (verde) para Vila do Conde (Retirado de Madeira, 2021)

Relativamente ao porto da Nazaré (Figura 1-5), as configurações das condições de fronteira para o cálculo da agitação marítima são as mesmas utilizadas no porto de Vila do Conde.

No que diz respeito aos limites, a malha exterior do Porto da Nazaré situa-se entre 39.649°N e 09.215°W e 39.537°N e 09.069°W, tem uma dimensão de 156.9 km² e uma resolução espacial de 418 x 414 m².



Figura 1-5: Representação das malhas exterior (amarelo) e interior (verde) para a Nazaré (Retirado de Madeira, 2021)

O porto de Portimão (Figura 1-6) possui uma malha exterior com limites entre 37.124°N, 08.597°W, 36.984°N e 08.451°W, tem uma dimensão de 200 km² e uma resolução espacial de 430 x 512 m².

À semelhança dos outros dois portos, as configurações de forçamento na fronteira do domínio encaixado são idênticas.



Figura 1-6: Representação das malhas exterior (amarelo) e interior (verde) para Portimão (Retirado de Madeira, 2021)

O modelo *Delft3D-WAVE* exporta um ficheiro com os seus cálculos no formato *NetCDF* (*Network Common Data Form*), onde para cada ponto da grelha interna possui a informação de diversos parâmetros com uma correspondente marca temporal. No que diz respeito ao intervalo entre séries, os registos calculados pelo modelo possuem um passo temporal de 3 horas.

1.2 Métodos estatísticos aplicados

Neste estudo pretende-se validar o modelo *Delft3D*, através de comparações sucessivas entre os dados gerados pelo modelo e dados adquiridos pelas boias. Para a realização das comparações entre os parâmetros já mencionados, recorreu-se a diferentes estimadores estatísticos: o viés ou *bias* (fórmula 1), valores máximos (max), valores médios (fórmula 2), raiz do erro quadrático médio normalizado (*NRMSE*) (fórmula 3), coeficiente de correlação (*r*) (fórmula 4), raiz do erro quadrático médio (*RMSE*) (fórmula 5) e desvio padrão (σ) (fórmula 6).

O *bias* ou viés representa a diferença média entre os valores estimados e os valores observados. Este estimador tem por finalidade indicar o enviesamento dos dados em análise e por sua vez indicar a existência de subestimação ou sobrestimação.

Fórmula 1: Viés, bias,

$$bias_{xy} = \frac{1}{N} \times \sum (x_i - y_i)$$

Fórmula 2: Média, $\bar{x}$,

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

O *RMSE* é maioritariamente utilizado como uma métrica estatística para a medição do desempenho de modelos meteorológicos e climáticos. Na prática, corresponde à soma da variância com o *bias* ao quadrado. É um indicador da qualidade e precisão dos resultados e quantifica o erro do estudo (Chai e Draxler, 2014).

Fórmula 3: Root mean square error, RMSE,

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

O *NRMSE* corresponde ao *RMSE* dividido pela média dos dados observados. A sua utilização facilita a comparação entre conjuntos de dados com diferentes dimensões. Neste caso, entre as diferentes classes.

Fórmula 4: Normalized root mean square error, NRMSE,

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}}$$

O coeficiente de correlação também denominado por coeficiente de *Pearson*, é utilizado como medida de correlação entre duas variáveis e habitualmente aplicado em questões de regressão linear. Os resultados deste coeficiente estão compreendidos entre -1 e 1, sendo que resultados positivos indicam a existência de uma correlação positiva, variáveis diretamente correlacionadas, e quanto mais próximo de 1 for o

resultado maior é a correlação. Para resultados negativos verifica-se correlação negativa. Correlações com resultados entre 0,5 e 0,7 classificam-se como moderadas e entre 0,7 e 0,9 como elevadas (Abdi, 2007).

Fórmula 5: Coeficiente de correlação, r ,

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}$$

Fórmula 6: Desvio padrão, σ ,

$$std = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Nas fórmulas 1 a 6, a variável x_i representa os dados calculados pelo modelo e a variável y_i os dados registados pelas boias. O N representa o número de observações.

1.3 Processamento de Dados

Neste subcapítulo, esclarecem-se os procedimentos aplicados no manuseamento e tratamento dos dados anteriores à análise e comparação dos mesmos. Destes fazem parte, formatação do conjunto de dados, deteção de lacunas e descrição dos dados obtidos. Como resultado, foram obtidos seis conjuntos de dados, dois para cada porto em estudo, sendo um para os dados das boias e outro para os do modelo. Os dois conjuntos de dados, pós-processados, de cada porto correspondem-se temporalmente, possuindo por isso o mesmo número de amostras.

Todos os procedimentos aplicados no tratamento de dados foram realizados com recurso ao Python®.

A primeira tarefa, uma vez que cada conjunto de dados possui um ficheiro para cada mês, resume-se na compilação dos mesmos, resultando numa pequena base de dados para cada boia e área do modelo. O modelo realiza cálculos para vários pontos de uma determinada área. Desta forma, foi necessário encontrar os pontos das áreas do modelo com as coordenadas mais próximas às posições de cada boia. Os ficheiros originais das boias e do modelo apresentam valores de vários parâmetros que não foram

utilizados neste estudo. Deste modo, foram apenas extraídos o grupo data-hora e os parâmetros já referidos na secção 1.1.1, necessários para as comparações (exemplo de código para os ficheiros da Nazaré consultável no Apêndice A).

Os ficheiros exportados pelas boias e pelo modelo possuem lacunas e intervalos diferentes entre os registos. Assim, procedeu-se à homogeneização temporal dos conjuntos de dados, obtendo-se bases de dados para as boias e para o modelo apenas com registos correspondentes em ambos. Como resultado, os ficheiros correspondentes a Leixões possuem 2999 registos, os da Nazaré 2747 registos e os de Faro 3741 registos (exemplo de código para os dados da Nazaré consultável no Apêndice B).

Para efetuar as comparações e evidenciar as diferenças entre os cálculos realizados pelo modelo e os registos provenientes das observações das boias foram elaboradas várias representações gráficas, que serão visualizadas no capítulo seguinte.

A primeira representação corresponde a três gráficos da H_s em função do tempo para os três portos em análise. Nestas representações não foi realizada homogeneização dos dados, sendo visível os períodos associados a lacunas nos dados das boias e do modelo (código consultável no Apêndice C).

Em seguida, no início de cada subcapítulo estão representados histogramas polares, com o intuito de apresentar sucintamente as condições médias verificadas em cada porto com base nos dados das boias. Estas representações foram realizadas apenas para os parâmetros da H_s e T_p e indicam a frequência da direção da ondulação e a frequência das várias magnitudes dos parâmetros em análise. A realização das mesmas foi feita com recurso à biblioteca “*windrose*” existente no Python® (exemplo de código para os dados da H_s na Nazaré consultável no Apêndice D).

Em complemento são apresentadas duas tabelas. Na primeira constam os valores médios, máximos e desvios padrão da H_s , do $Tm02$, do T_p e do $PkDir$ registados pelas boias e pelo modelo e a segunda com os valores da correlação, do erro quadrático e do viés.

A primeira comparação gráfica é efetuada através de diagramas de dispersão onde são também apresentadas a reta de melhor ajuste, a reta $y=x$ e o valor do r (exemplo de código para os dados da H_s na Nazaré consultável no Apêndice E).

As restantes comparações são executadas através de gráficos de barras. Os primeiros apresentam os valores do *bias* e do *NRMSE* em classes de H_s , $Tm02$ e T_p .

Os seguintes, apresentam igualmente os valores do *bias* e do *NRMSE*, no entanto em classes de direção e apenas para os parâmetros da *Hs* e do *Tp*. Deste modo, através da segmentação das variáveis, é possível avaliar a consistência do modelo em diferentes condições e em diferentes direções, possibilitando a identificação das situações em que se antevê pior desempenho do mesmo (exemplo de código para os dados da *Hs* na Nazaré consultável no Apêndice F).

Por forma a facilitar a interpretação da informação foram atribuídas designações às classes de direção. Cada classe possui um intervalo de 30°. A tabela 1-2 apresenta as designações atribuídas.

Tabela 1-2: Designação das direções.

Designação	Direções (°)
N	345 – 015
NNE	015 – 045
ENE	045 – 075
E	075 – 105
ESE	105 – 135
SSE	135 – 165
S	165 – 195
SSW	195 – 225
WSW	225 – 255
W	255 – 285
WNW	285 – 315
NNW	315 – 345

2. Análise de Resultados

A avaliação da performance do modelo é essencial para que os seus resultados transmitam um elevado nível de confiança. A sua validação foi realizada através da comparação de dados gerados pelo modelo *WWIII* com os dados adquiridos *in-situ* pelas boias. Neste capítulo serão analisados os resultados obtidos através das comparações realizadas nos três portos em estudo: Vila do Conde, Nazaré e Portimão.

Através duma análise sucinta da figura 2-1, onde estão representados os valores da H_s em função do tempo nas localizações já mencionadas, é perceptível uma clara subestimação dos dados calculados pelo modelo, em especial nos eventos mais energéticos. Esta diferença entre o modelo e a boia é mais significativa no porto de Portimão.

Na figura 2-1 estão apenas representados dados com amostras correspondentes entre a boia e o modelo, onde se pode observar as diversas discontinuidades presentes nos conjuntos de dados e que prejudicam a análise dos mesmos. Como referido no capítulo 1 (secção 1.1 e 1.3), para o período em análise o número de registos adquiridos pelas boias de Leixões, Nazaré e Faro foram 9677, 15420 e 22341, respetivamente. No entanto, devido à falta de continuidade temporal das simulações disponíveis do modelo *Delft3D* no período correspondente, o número de registos simultâneos são apenas 2999, 2747 e 3741.

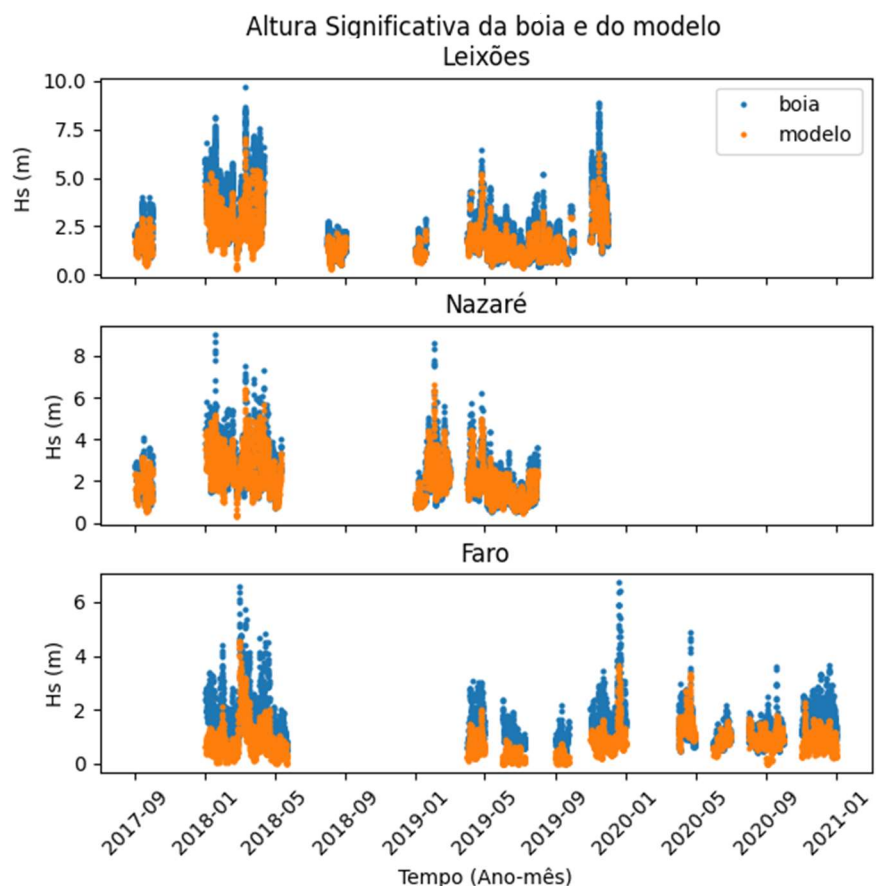


Figura 2-1: Comparação da altura significativa (H_s) entre os dados gerados pelo modelo e os dados observados pelas boias em Leixões, Nazaré e Faro.

2.1 Vila do Conde

O porto de Vila do Conde situa-se na costa ocidental portuguesa no troço final do Rio Ave, a cerca de 2 milhas a Sul do porto da Póvoa do Varzim, a 22 milhas a Sul de Viana do Castelo e a 10 milhas a norte do Porto de Leixões (Instituto Hidrográfico, 2015).

Da análise dos histogramas polares, apresentados em baixo (figuras 2-2 e 2-3), é possível verificar que o rumo da agitação marítima neste porto se orienta sobretudo nos setores WNW (Oeste-noroeste) e NNW (Nor-noroeste). Aproximadamente metade dos registos de H_s são inferiores a 2 m. A vaga associada a períodos de pico inferiores a 10 s é maioritariamente de NNW e os eventos mais energéticos ($H_s > 4$ m) caracterizam-se por uma direção de pico de WNW.

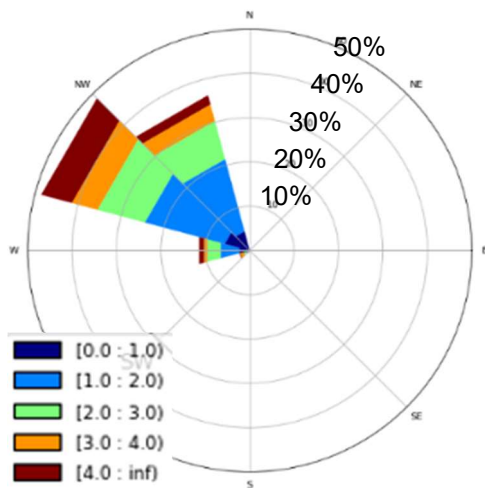


Figura 2-3: Histograma polar da H_s da ondulação registada pela boia de Leixões Costeira.

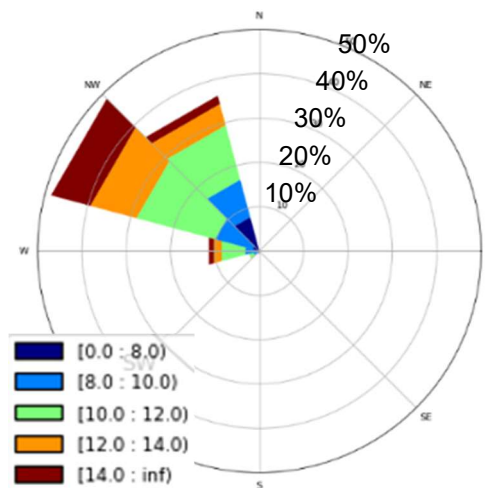


Figura 2-2: Histograma polar do período de pico da ondulação registada pela boia de Leixões Costeira.

Na Tabela 2-1 estão para os quatro parâmetros em estudo, a H_s , o $Tm02$, o Tp e a $PkDir$, representados o valor médio, o desvio padrão (σ) e o valor máximo, exceto para a $PkDir$, da boia de Leixões Costeira e respetivo ponto do modelo.

Após o tratamento estatístico dos dados (Tabela 2-1), verificou-se que na costa de Leixões o valor médio de H_s observado pela boia e pelas previsões do modelo são 2,21 m e 1,94 m, respetivamente, corroborando a subestimação do modelo passível de ser verificada visualmente no gráfico da H_s em função do tempo (figura 2-1). Também o valor médio do Tp calculado pelo modelo é inferior ao registado pela boia. No que diz respeito ao valor médio do $Tm02$, este não verifica a tendência de subestimação identificada nos outros parâmetros. Os valores máximos das três variáveis referidas acompanham as tendências dos valores médios. Os valores do σ são semelhantes entre a boia e o modelo com exceção do $PkDir$, onde se observa um valor muito superior referentemente aos dados do modelo.

Tabela 2-1: Estatísticas da costa de Leixões, comparação os dados gerados pelo modelo e os registados

	Boia			Delft3D		
Variáveis	Média	σ	Máximo	Média	σ	Máximo
H_s (m)	2,21	1,27	8,51	1,94	1,06	7,01
$Tm02$ (s)	6,66	1,62	12,50	7,05	1,68	12,86
Tp (s)	10,77	2,63	18,20	10,00	2,07	17,65
$PkDir$ (°)	303,81	21,75	-	311,21	67,51	-

pela boia.

Na Tabela 2-2 estão representados os valores do r , da raiz quadrada do erro quadrático médio e do viés (*bias*) entre os dados gerados pelo modelo e registados pela boia. Verifica-se uma correlação muito forte entre os dados da Hs (0,91) e forte entre os dados do $Tm02$ (0,75) e do Tp (0,69). Com recurso aos valores do *bias* verifica-se novamente uma ligeira subestimação dos parâmetros da Hs e do Tp e sobrestimação do $Tm02$.

Tabela 2-2: Correlação, raiz do erro quadrático e viés entre os dados gerados pelo modelo e as observações da boia, para todo o período em Leixões.

Variáveis	r	RMSE	bias
Hs (m)	0,91	0,60	- 0,28
Tm02 (s)	0,75	1,22	0,40
Tp (s)	0,69	2,07	- 0,78

Os gráficos seguintes (figura 2-4 e 2-5) representam diagramas de dispersão dos parâmetros da Hs e do $Tm02$ para o porto de Leixões.

Nestes gráficos é analisada a dispersão entre os dados do modelo e os dados das boias, e comparada a reta que melhor se ajusta à distribuição dos dados com a reta $y=x$, que representa a reta ideal onde o modelo calcularia os valores com exatidão perfeita.

No diagrama de dispersão referente à Hs (figura 2-4), constata-se visualmente uma maior dispersão dos dados para condições mais energéticas. O declive da reta (0,76), indica-nos o aumento da tendência de subestimação por parte do modelo com o aumento da Hs . A interseção das retas indica a sobrestimação dos valores de Hs inferiores a aproximadamente 1,0 m, enquanto para os restantes dados se constata subestimação dos mesmos. O elevado valor do r indica uma baixa dispersão do conjunto de dados.

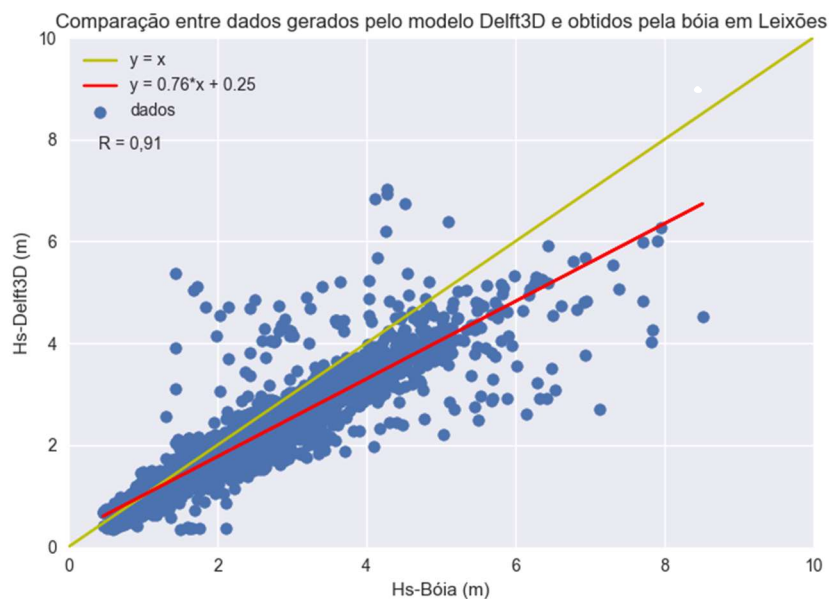


Figura 2-4: Diagrama de dispersão da altura significativa (H_s) entre os dados calculados pelo modelo e observados pela bóia na costa de Leixões.

No diagrama de dispersão do $Tm02$, é verificada visualmente a elevada dispersão dos dados. O cruzamento das retas apresentadas indica uma mudança na tendência nos dados calculados pelo modelo. Deste modo, é identificada a tendência de sobrestimação do modelo para valores inferiores a aproximadamente 9 s e em contrapartida a tendência de subestimação em valores superiores a 9 s.

Não obstante a existência de vários *outliers* e a mancha formada pela dispersão dos dados na figura 2-5, verificam-se valores do declive da reta (0,78) e do r (0,75) satisfatórios.

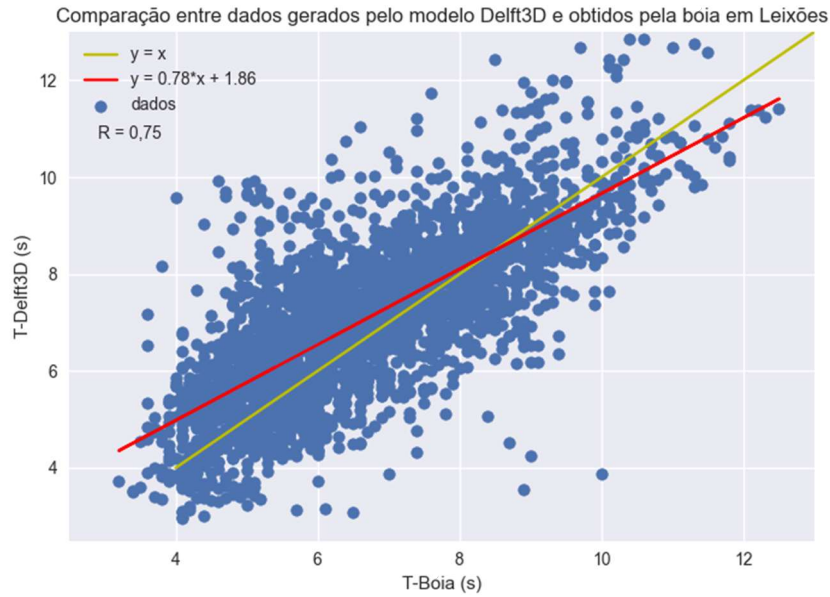


Figura 2-5: Diagrama de dispersão do período médio ($Tm02$) entre os dados calculados pelo modelo e observados pela boia na costa de Leixões.

Com o intuito de analisar o desempenho do modelo em diferentes condições foram elaboradas representações na forma de gráficos de barras, onde se divide a Hs , o $Tm02$ e o Tp em várias classes. Para realizar a avaliação do desempenho do modelo recorreu-se a dois estimadores estatísticos, nomeadamente ao *bias* e ao *NRMSE*. As classes de cada parâmetro para cada estação foram ajustadas de forma, que cada classe fosse constituída por um número considerável de ocorrências.

Antes de cada gráfico é apresentada uma tabela (Tabela 2-3 a 2-5) com o número de registos observado em cada classe. O número de amostras das classes de Hs podem ser consultados na tabela 2-3.

Tabela 2-3: Número de amostras das classes de Hs em Leixões.

Classe	Registos
< 1	386
1 a 2	1163
2 a 3	691
3 a 4	335
> 4	309

O enviesamento e a raiz do erro quadrático normalizado entre o modelo e a boia por classes de H_s são apresentados nas figuras 2-6 e 2-7, respetivamente. Como já se antevia pelo diagrama de dispersão de H_s (figura 2-4), verifica-se uma subestimação em todas as classes com erros entre 17% a 27%. O enviesamento aumenta linearmente com H_s para as classes inferiores a 4 m com um erro aproximadamente uniforme na ordem dos 20%. Para a classe associada a eventos extremos, definida para valores da boia acima dos 4 m, o desvio é superior com um valor de $NRMSE$ de 27%.

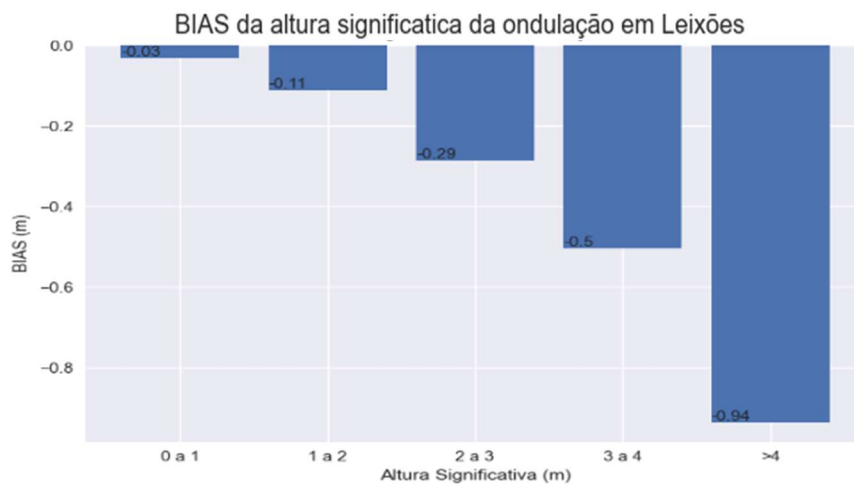


Figura 2-6: Representação do *bias* da H_s em classes de H_s na costa de Leixões.

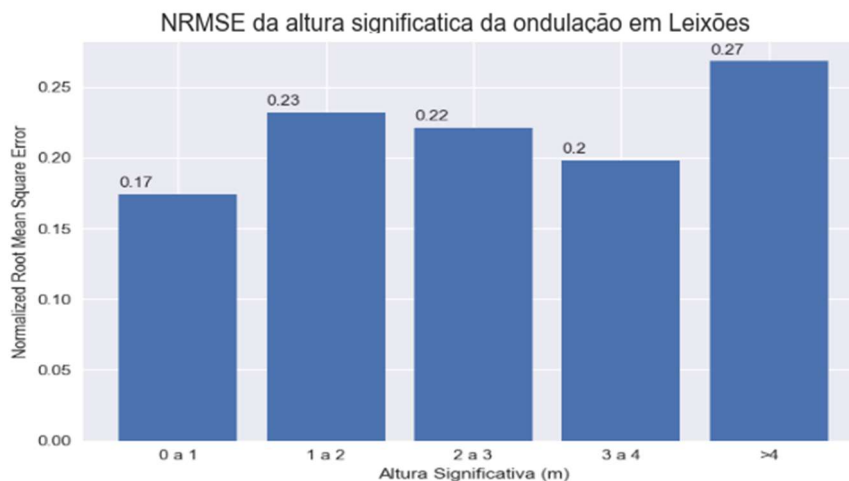


Figura 2-7: Representação do $NRMSE$ da H_s em classes de H_s na costa de Leixões.

O número exato de registos de cada classe de *Tm02* pode ser consultado na tabela 2-4.

Tabela 2-4: Número de amostras das classes de *Tm02* em Leixões.

Classe	Registos
< 6	1213
6 a 7	572
7 a 8	479
8 a 10	536
> 10	84

Nas figuras 2-8 e 2-9 são apresentados o enviesamento e a raiz do erro quadrático normalizado, respetivamente, entre o modelo e boia por classes do *Tm02*. No seguimento da informação apresentada pelo diagrama de dispersão (figura 2-5) e ao contrário da tendência dos outros parâmetros no mesmo porto, verifica-se sobrestimação nas classes com períodos inferior a 8 s. Para as restantes classes verifica-se subestimação nos cálculos do modelo. O erro ronda os 15% com exceção da classe de período inferior a 6 s, correspondente aos eventos de vaga, cujo erro é de 26%. Em termos absolutos, o enviesamento diminui linearmente com o aumento do *Tm02* até aos 8 s e aumenta a partir desse ponto.

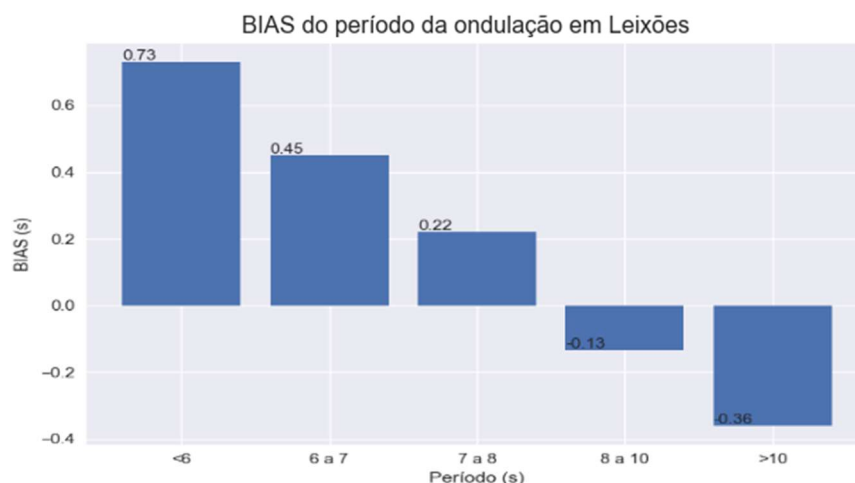


Figura 2-8: Representação do *bias* do *Tm02* em classes do *Tm02* na costa de Leixões.

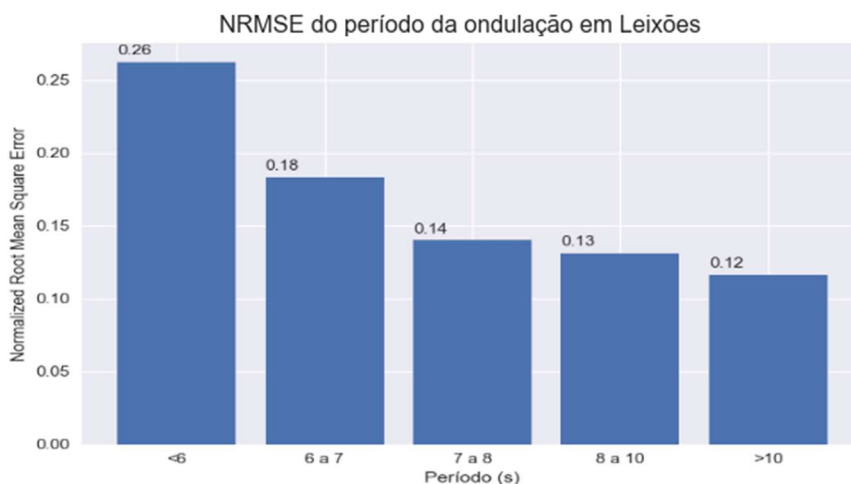


Figura 2-9: Representação do *NRMSE* do *Tm02* em classes de *Tm02* na costa de Leixões.

O número de registos em cada classe do *Tp* pode ser consultado na tabela 2-5.

Tabela 2-5: Número de amostras das classes de *Tp* em Leixões.

Classe	Registos
< 8	565
8 a 10	654
10 a 12	799
12 a 14	509
> 14	357

Por último, o enviesamento e a raiz do erro quadrático normalizado entre o modelo e a boia por classes de *Tp* são apresentados nas figuras 2-10 e 2-11, respetivamente. Verifica-se uma subestimação do modelo para todas as classes correspondentes a *Tp* superiores a 8 s com erros entre 14% a 22% e um aumento linear do enviesamento. A exceção situa-se na classe de *Tp* inferior a 8 s onde o valor do *bias* indica sobrestimação dos dados e um erro superior às restantes classes com um valor de *NRMSE* de 30%.

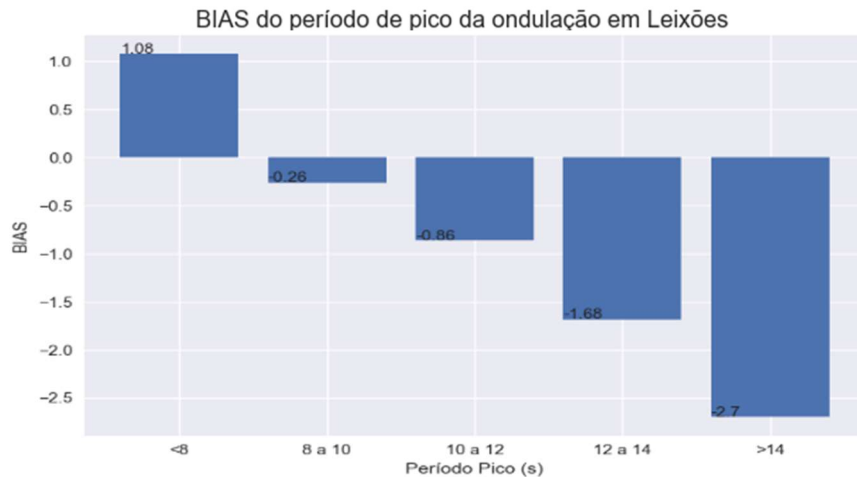


Figura 2-10: Representação do *bias* do T_p em classes de T_p na costa de Leixões.

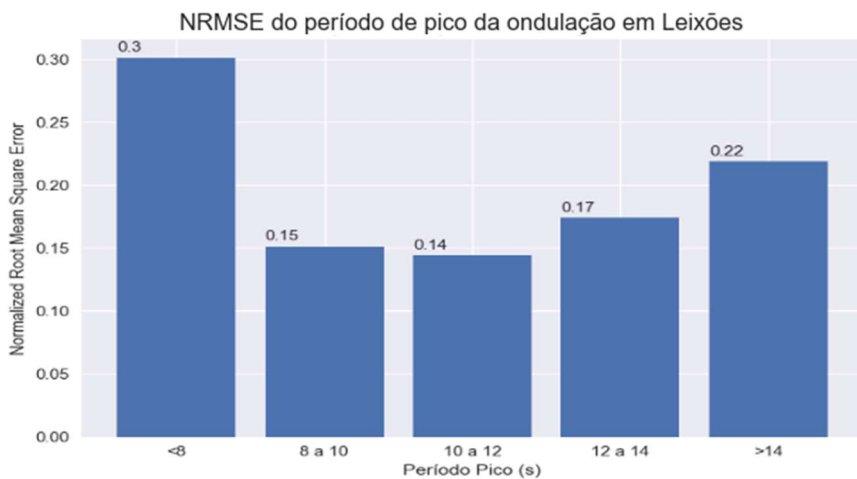


Figura 2-11: Representação do *NRMSE* do T_p em classes T_p na costa de Leixões.

Nas duas análises aos parâmetros resultantes dos valores do período, $Tm02$ e T_p , destaca-se os valores mais elevados do *NRMSE* nas classes correspondentes aos eventos de vaga, 26% e 30% respetivamente.

Após a análise da performance do modelo em diferentes classes de cada parâmetro, são desenvolvidas novas representações com o intuito de avaliar o desempenho do modelo em função da direção da ondulação. Deste modo, serão apresentadas representações do *bias* e do *NRMSE* (figura 2-12 a 2-15) em classes de direção para a H_s e para o T_p . Para a divisão dos dados em classes de direção foi utilizado o parâmetro correspondente à direção média associada ao T_p uma vez que uma das estações não possui informação relativamente à direção média da ondulação.

Para a realização da análise do conjunto de dados referentes a Leixões foram divididos os registos em seis setores, selecionados pela presença do maior volume de amostras. As direções selecionadas são: Sul (S), Su-sudoeste (SSW), Oeste-sudoeste (WSW), W, WNW e NNW. Não foi incluído o setor N, uma vez este não possui qualquer registo. Os setores Sul e SSW possuem apenas 3 e 22 registos, respetivamente, sendo que as estatísticas calculadas para os mesmos expressam pouca confiança.

Tabela 2-6: Número de registos por direção em Leixões.

Direções	S	SSW	WSW	W	WNW	NNW	N
Nº registos	3	22	74	374	1435	976	0

O enviesamento e a raiz do erro quadrático normalizado da H_s entre o modelo e a boia por classes de direção são apresentados na figura 2-12 e figura 2-13, respetivamente. Como já se antevia pelo diagrama de dispersão da H_s (figura 2-4) e pela representação do *bias* da H_s em classes de H_s (figura 2-6) verifica-se uma subestimação do modelo em todas as direções à exceção de SSW, direção com poucos registos e com um erro de 46%. Nas restantes classes o valor do erro varia entre 24% e 35%.

Tendo em conta apenas as direções W, WNW e NNW, correspondentes às direções com maior volume de registos, os valores do *bias* apresentam-se uniformes na ordem dos -0,30 m. O erro percentual é superior para a direção W com um valor de 35% em comparação com o erro de 25% das restantes direções mencionadas.

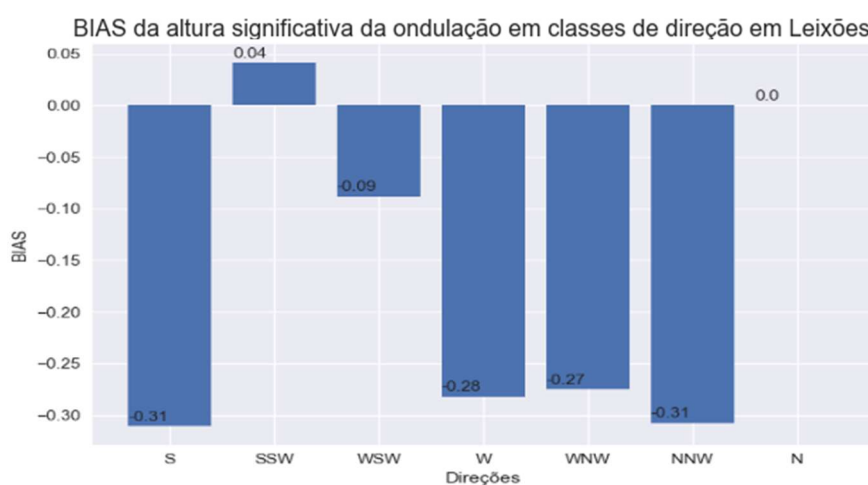


Figura 2-12: Representação do *bias* da H_s em classes de direção na costa de Leixões.

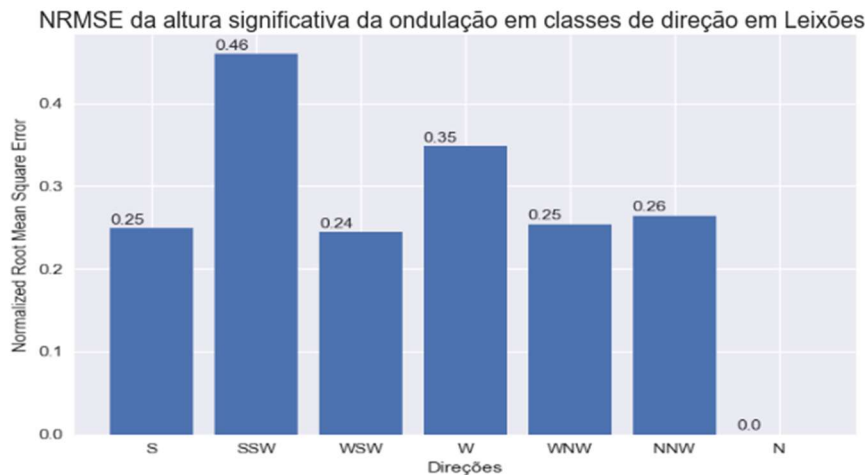


Figura 2-13: Representação do *NRMSE* da *Hs* em classes de direção na costa de Leixões.

Nas figuras 2-14 e 2-15 estão representados, novamente, o enviesamento e a raiz do erro quadrático normalizado entre os registos da boia e os cálculos do modelo, porém, neste caso do *Tp* em classes de direção. Analisando apenas as quatro direções com maior número de registos, sendo elas WSW, W, WNW e NNW, verifica-se subestimação do modelo em todas classes mencionadas com um erro aproximadamente uniforme, com valores a variar entre 15% e 21%. Os valores máximos do enviesamento sucedem-se na direção W e WNW com valores de aproximadamente -1 s, que para o parâmetro do *Tp* é pouco significativo.

Relativamente às classes com menor volume de amostras, S e SSW, constata-se erros maiores e sobrestimação dos dados, contrariando a tendência das restantes classes.

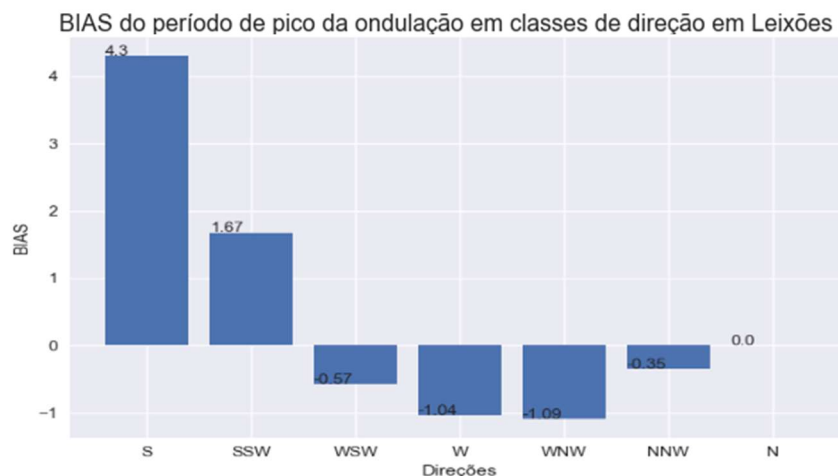


Figura 2-14: Representação do *bias* do *Tp* em classes de direção na costa de Leixões.

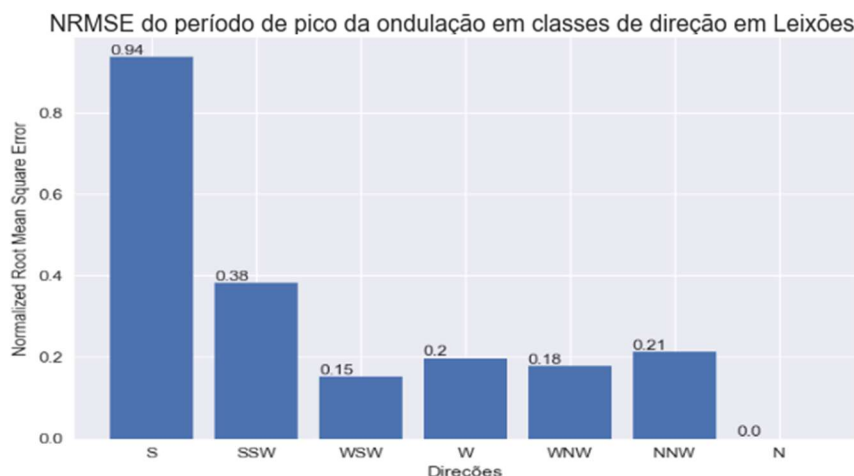


Figura 2-15: Representação do $NRMSE$ do T_p em classes de direção na costa de Leixões.

2.2 Nazaré

O porto da Nazaré situa-se na costa ocidental portuguesa na parte Sul da Enseada da Nazaré. Segundo o Instituto Hidrográfico (2015), este porto destina-se essencialmente a prestação de apoio às atividades da comunidade piscatória local e dista de 210 km a Sul da cidade do Porto e a 120 km a Norte de Lisboa.

Em consequência da posição geográfica semelhante à do porto de Vila do Conde na costa Oeste portuguesa, o porto da Nazaré apresenta, ao largo, condições de agitação marítima similares ao anterior, sendo por isso expectável registos e resultados das comparações semelhantes. Desta forma, corroborando a afinidade, verifica-se através da análise dos histogramas polares resultantes dos registos da boia da Nazaré (figura 2-16 e 2-17) que as ondas são maioritariamente provenientes dos setores de WNW e NNW. Constatam-se valores de H_s ligeiramente superiores, em comparação com o porto de Vila do Conde, sendo que cerca 40% dos registos correspondem a ondulação com H_s inferior a 2,0 m. À semelhança do porto anteriormente analisado, também a vaga associada a T_p inferiores a 10 s é maioritariamente proveniente do setor de NNW e os eventos mais energéticos estão associados ao setor de WNW.

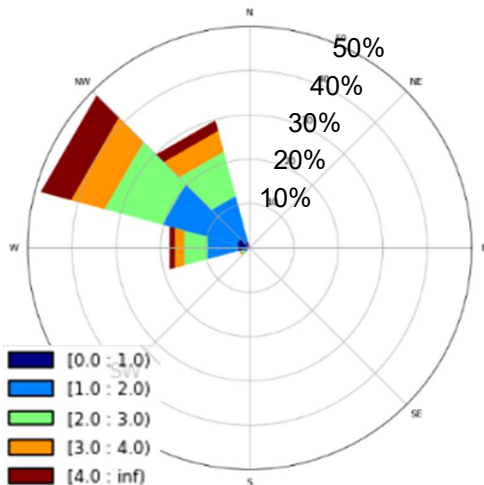


Figura 2-17: Histograma polar da H_s da ondulação registada pela boia da Nazaré Costeira.

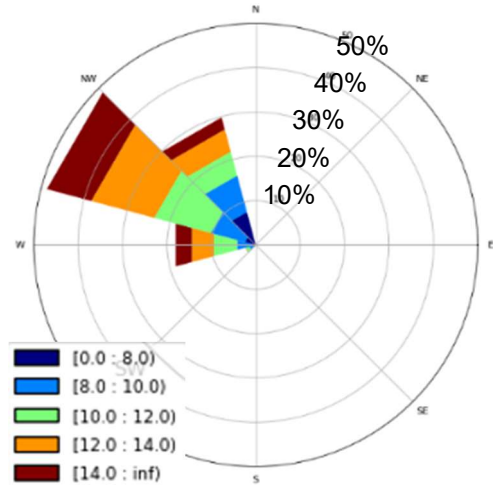


Figura 2-16: Histograma polar do período de pico da ondulação registada pela boia da Nazaré Costeira.

Na tabela 2-7 estão representados o valor médio, o σ e o valor máximo dos quatro parâmetros em estudo, H_s , $Tm02$, Tp e $PkDir$, à exceção do valor máximo da $PkDir$, dos registos da boia da Nazaré costeira e do respetivo modelo.

Numa primeira observação dos resultados da tabela 2-7, por meio dos valores médios e máximos é possível verificar a subestimação do modelo dos parâmetros da H_s , corroborando os dados apresentados na figura 2-1, do $Tm02$ e do Tp . Em comparação com a tabela 2-1, referente a Leixões, constata-se um ligeiro aumento na diferença entre os valores médios do $Tm02$ e do Tp registados pela boia e pelo modelo.

Tabela 2-7: Estatísticas da costa de Nazaré, comparação os dados gerados pelo modelo e os registados pela boia.

Variáveis	Boia			Delft3D		
	Média	σ	Máximo	Média	σ	Máximo
H_s (m)	2,41	1,23	9,01	2,19	1,02	6,59
$Tm02$ (s)	7,42	1,73	14,59	6,11	1,86	13,43
Tp (s)	11,33	2,75	20,92	10,40	2,24	17,65
$PkDir$ (°)	302,01	20,49	-	313,59	41,15	-

Na tabela 2-8 estão apresentados os valores do r , da raiz quadrada do erro quadrático médio e do viés (*bias*) entre os dados gerados pelo modelo e registados pela boia. Nesta tabela é possível verificar uma correlação muito forte entre os dados da H_s (0,89) e uma correlação forte do $Tm02$ (0,71) e do Tp (0,69). Comparando com os

valores de correlação obtidos na tabela 2-2, referente a Leixões, verificam-se resultados semelhantes.

Também os valores do *RMSE* são semelhantes à tabela 2-2. A maior diferença reside no parâmetro do *Tm02* onde existe um ligeiro aumento no valor do erro, em relação aos dados de Vila do Conde.

Relativamente ao viés constata-se, novamente, um comportamento semelhante do modelo aos dados da tabela 2-2, exceto no parâmetro do *Tm02*. O valor que era positivo na tabela 2-2, referente ao parâmetro do *Tm02*, é negativo na tabela 2-8. Verifica-se assim, a tendência de subestimação de todos os parâmetros por parte do modelo na Nazaré.

Tabela 2-8: Correlação, raiz do erro quadrático e viés entre os dados gerados pelo modelo e as observações da boia, para todo o período em Nazaré.

Variáveis	r	RMSE	bias
Hs (m)	0,89	0,62	- 0,21
Tm02 (s)	0,71	1,89	- 1,30
Tp (s)	0,69	2,22	- 0,93

As figuras 2-18 e 2-19 representam diagramas de dispersão para os parâmetros da *Hs* e do *Tm02* na Nazaré, onde estão incluídas as retas de melhor ajuste para os conjuntos de dados.

Analisando a figura 2-18 é possível constatar pela silhueta da distribuição dos pontos e pela reta de melhor ajuste, as semelhanças existentes com o diagrama de dispersão da *Hs* em Leixões (figura 2-4), constituindo-se assim, mais uma evidência da similitude dos conjuntos de dados obtidos pelas boias e pelo modelo, e no seguimento, a verificação de um desempenho semelhante do modelo em ambos os portos.

Deste modo, a partir do declive da reta é possível denotar o aumento da tendência de subestimação e com recurso às duas retas verifica-se a subestimação da maior parte dos dados por parte do modelo. No entanto, devido à interseção das retas observa-se que existe uma tendência de sobrestimação de um pequeno conjunto de dados, correspondentes a valores de *Hs* inferiores a aproximadamente 1,5 m. Como já tinha sido referido, a correlação entre dados é elevada e o declive da reta satisfatório.

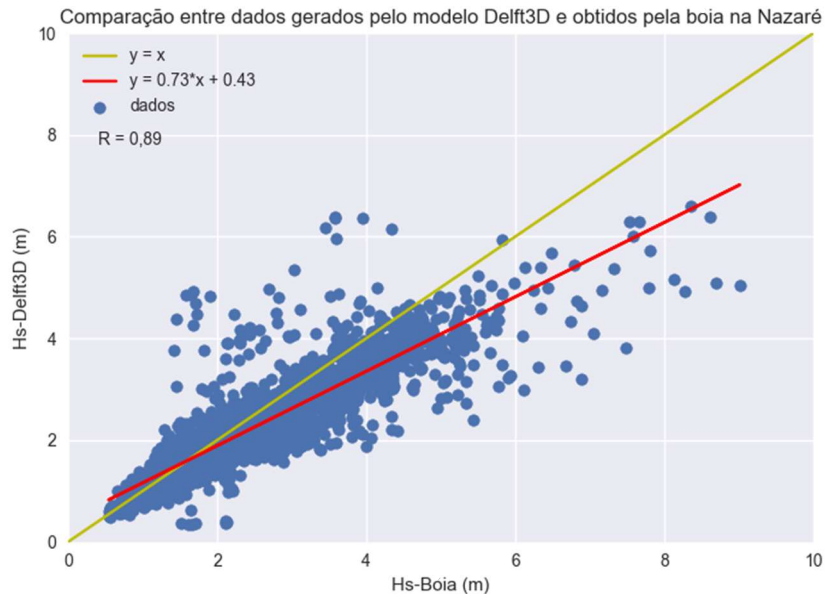


Figura 2-18: Diagrama de dispersão da altura significativa (H_s) entre os dados calculados pelo modelo e adquiridos pela boia na costa da Nazaré.

O diagrama de dispersão do $Tm02$ (figura 2-19) apresenta visualmente uma elevada dispersão dos dados. O posicionamento da reta de melhor ajuste relativamente à reta $y=x$ indica a tendência de subestimação dos cálculos do modelo perante os valores registados pela boia. O valor do declive (0,76) sugere o aumento da subestimação dos dados com o aumento do $Tm02$. Novamente, a conjugação do declive da reta de melhor ajuste e o valor elevado do r (0,71) é um indício de um bom desempenho global no cálculo do $Tm02$ por parte do modelo.

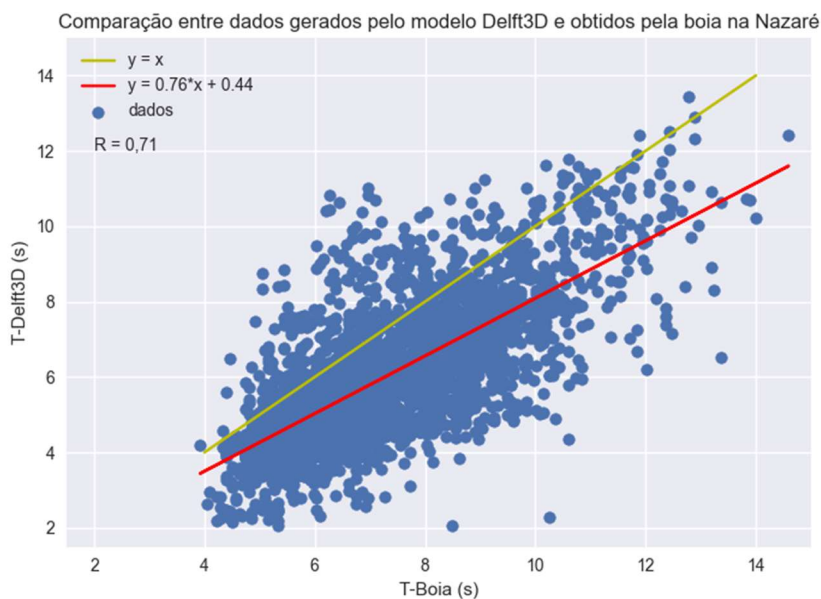


Figura 2-19: Diagrama de dispersão do período médio ($Tm02$) entre os dados calculados pelo modelo e recolhidos pela boia na costa da Nazaré.

As figuras 2-20 a 2-25 são representações no formato de gráficos de barras, onde se divide os parâmetros da H_s , $Tm02$ e Tp em classes do parâmetro em análise. Por forma a realizar a análise do modelo, cada variável possui duas figuras, uma com a representação do *bias* e outra do *NRMSE*.

Tabela 2-9: Número de amostras das classes de H_s na Nazaré.

Classe	Registos
< 1	219
1 a 2	985
2 a 3	808
3 a 4	403
> 4	297

Na figura 2-20 e 2-21 são apresentados o enviesamento e a raiz do erro quadrático normalizado, respetivamente, entre o modelo e boia por classes de H_s . Como já se antevia pelo diagrama de dispersão da H_s (figura 2-18), constata-se uma ligeira sobrestimação das primeiras classes, com H_s inferior a 2 m e a subestimação das restantes, verificando-se erros a variar entre 17% e 26%. A classe associada a eventos mais energéticos, definida para valores dos registos da boia de H_s superior a 4 m, destaca-se das restantes pelo seu enviesamento, verificando-se uma variação em módulo muito superior às restantes e com um valor percentual do erro de 26%.

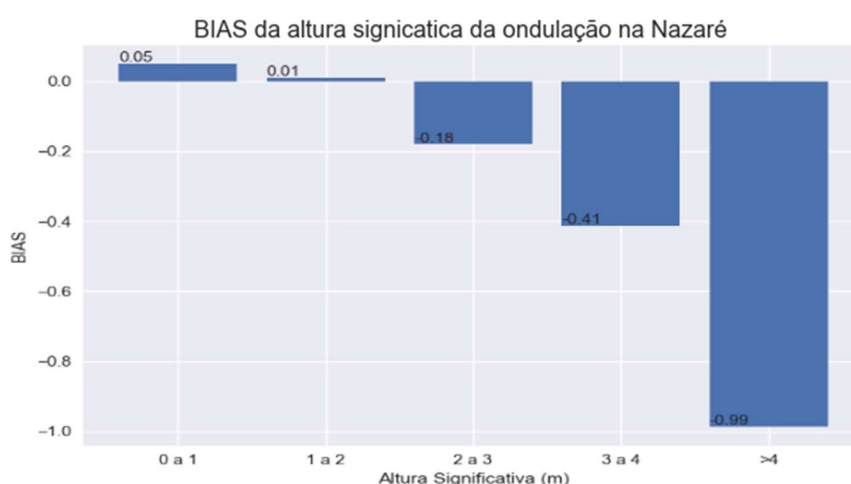


Figura 2-20: Representação do *bias* da H_s em classes de H_s na costa da Nazaré.

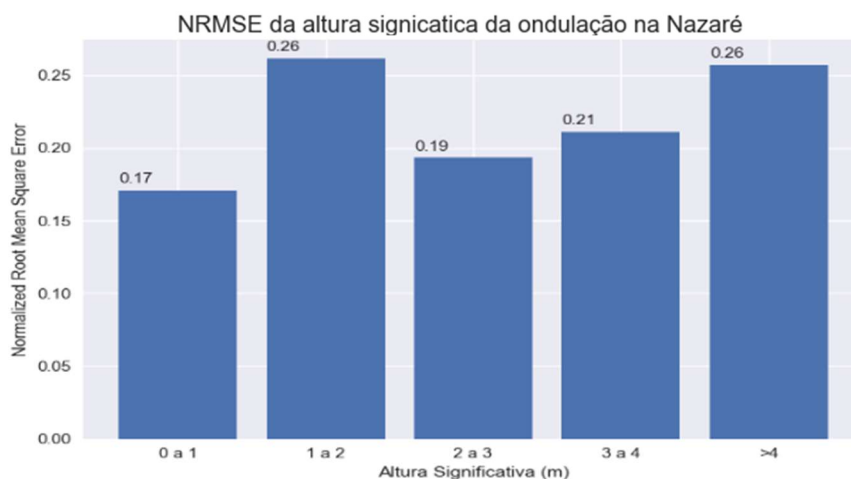


Figura 2-21: Representação do *NRMSE* da *Hs* em classes *Hs* na costa da Nazaré.

A tabela 2-10 apresenta o número de registos de cada classe de *Tm02*.

Tabela 2-10: Número de amostras das classes de *Tm02* na Nazaré.

Classe	Registos
< 6	602
6 a 7	652
7 a 8	563
8 a 10	664
> 10	231

O enviesamento e a raiz do erro quadrático normalizado entre o modelo e a boia por classes de *Tm02* são apresentados nas figuras 2-22 e 2-23, respetivamente. Tendo em conta a análise do diagrama de dispersão (figura 2-19), verifica-se a subestimação do modelo em todas as classes, onde se observa um erro aproximadamente uniforme de 25%. O enviesamento aumenta linearmente com o aumento do *Tm02*, constatando-se deste modo, o seu valor máximo em módulo na classe de maiores *Tm02*, superiores a 10 s, de -2,13 s.

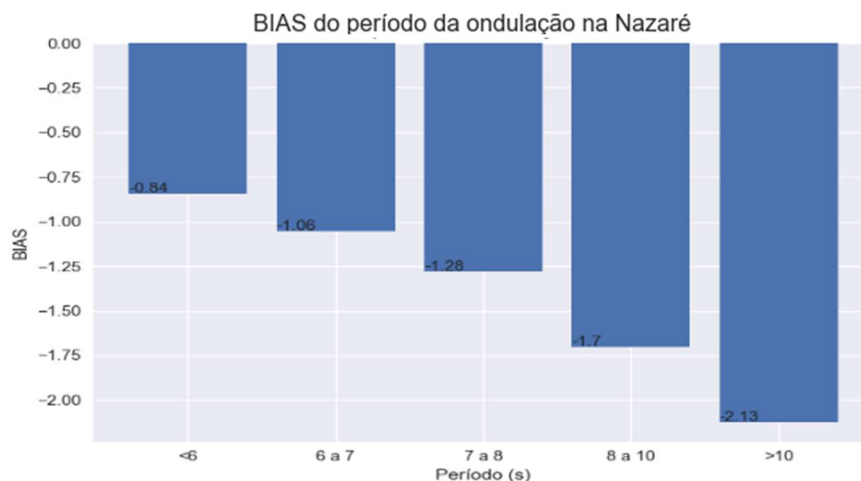


Figura 2-22: Representação do *bias* do $Tm02$ em classes de $Tm02$ na costa da Nazaré.

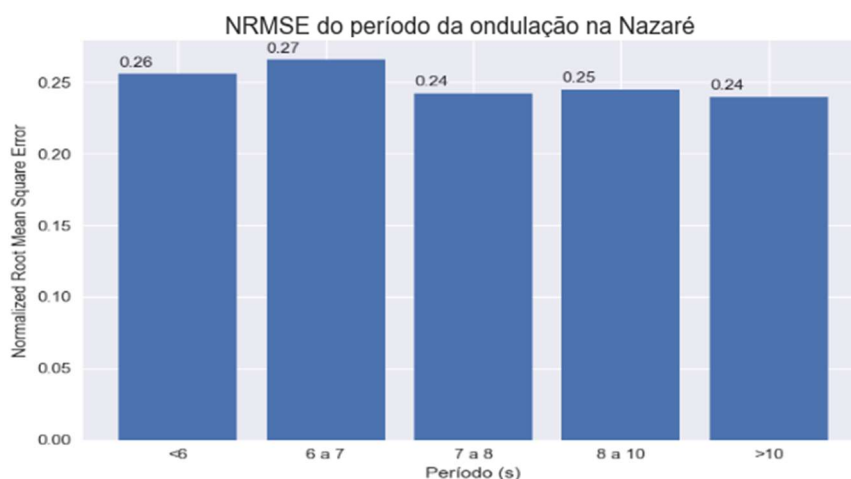


Figura 2-23: Representação do *NRMSE* do $Tm02$ em classes de $Tm02$ na costa da Nazaré.

O número de registos em cada classe do Tp na Nazaré pode ser consultado na tabela 2-11.

Tabela 2-11: Número de amostras das classes de Tp na Nazaré.

Classe	Registos
< 8	318
8 a 10	572
10 a 12	676
12 a 14	682
> 14	464

A figura 2-24 e 2-25 apresentam o enviesamento e a raiz do erro quadrático normalizado, respetivamente, entre o modelo e a boia em classes de T_p . As duas representações em questão são muito semelhantes às figuras 2-10 e 2-11, que correspondem à análise da mesma variável em Leixões. Deste modo, à semelhança dos resultados obtidos mais a Norte, verifica-se a subestimação de todas as classes com exceção da classe associada aos eventos de vaga ($T_p < 8$ s). Nas classes de T_p superior a 8 s constata-se um aumento linear do enviesamento com um erro a variar entre os 15% e os 21%. No que diz respeito à classe inferior a 8 s, esta destaca-se também pelo seu valor de *NRMSE* sendo este de 37%.

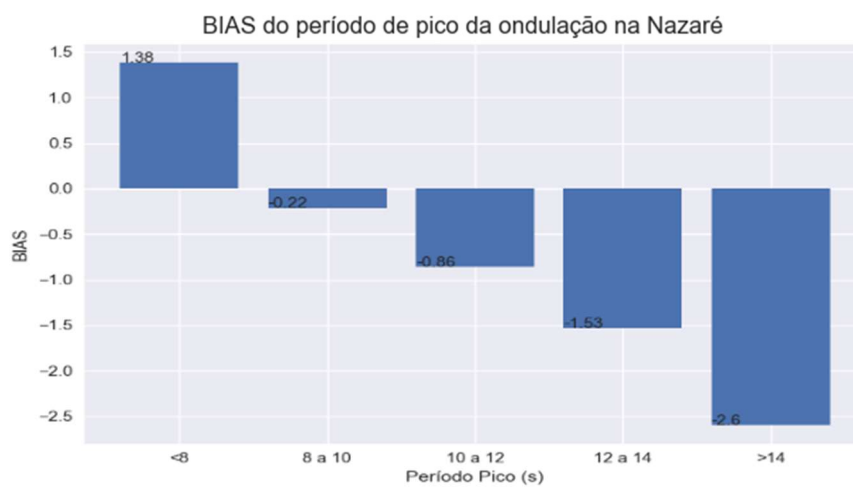


Figura 2-24: Representação do *bias* do T_p em classes de T_p na costa da Nazaré.

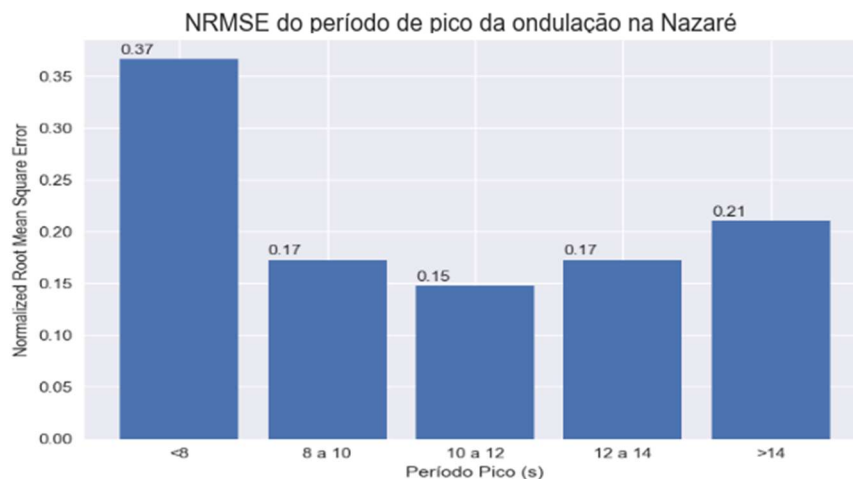


Figura 2-25: Representação do *NRMSE* do T_p em classes de T_p na costa da Nazaré.

No que concerne à análise dos dados em função da direção na estação da Nazaré, foram selecionados novamente os setores tendo em conta o volume de dados. Os setores em causa são SSW, WSW, W, WNW, NNW e N. Neste caso, verifica-se o quase inexistente número de registos nos setores S, SSW e N e por este motivo, não serão tidos em conta para a análise dos dados.

Tabela 2-12: Número de registos por direção na Nazaré.

Direções	S	SSW	WSW	W	WNW	NNW	N
Nº registos	0	1	65	504	1324	739	3

As figuras 2-26 a 2-29 apresentam as representações gráficas do *bias* e do *NRMSE* em classes de direção para os parâmetros da *Hs* e do *Tp*.

O enviesamento e a raiz do erro quadrático normalizado da *Hs* entre o modelo e a boia por classes de direção são apresentados nas figuras 2-26 e 2-27, respetivamente. Recorrendo novamente ao diagrama de dispersão da *Hs* (figura 2-18) e à análise da *Hs* em classes de *Hs* (figura 2-20 e figura 2-21), constata-se um equilíbrio entre o número de dados pertencentes a classes de sobrestimação e de subestimação. Verifica-se deste modo, um enviesamento negativo na maioria das direções com exceção da direção WSW, todavia o valor do enviesamento, 0,09 m, é pouco significativo uma vez que representa um enviesamento percentual de 4%. Nesta direção encontra-se também o maior erro com um *NMRSE* de 36%. Nas restantes classes o enviesamento varia entre -0,09 m e -0,31 m e possuem um erro aproximadamente uniforme na ordem dos 25%.

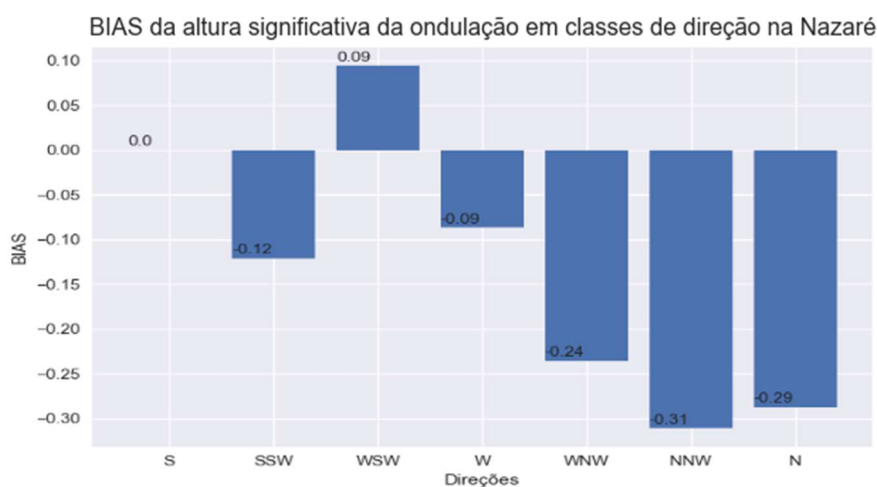


Figura 2-26: Representação do *bias* da *Hs* em classes de direção na costa da Nazaré.

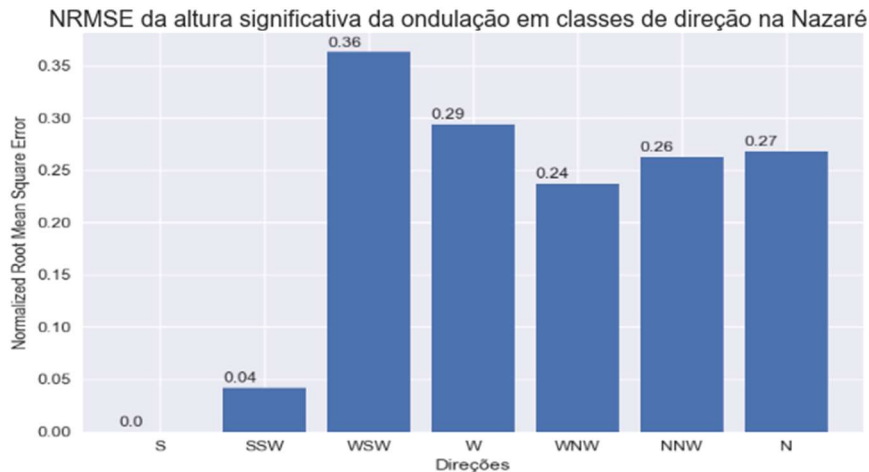


Figura 2-27: Representação do *NRMSE* da *Hs* em classes de direção na costa da Nazaré.

Por último, nas figuras 2-28 e 2-29 estão representados o enviesamento e a raiz do erro quadrático normalizado entre os registos da boia e os cálculos do modelo, porém, neste caso do *Tp* em classes de direção. Tendo em consideração apenas as direções com um número relevante de entradas, verifica-se a subestimação dos dados em todas as direções com um erro, aproximadamente, uniforme de 20%. Destacam-se as direções W e WNW pelos valores superiores de enviesamento em comparação com as restantes direções. Consta-se que, na figura 2-14, representação do *bias* do *Tp* em classes de direção em Leixões, também as direções W e WNW apresentavam um valor de enviesamento em módulo superior às demais.

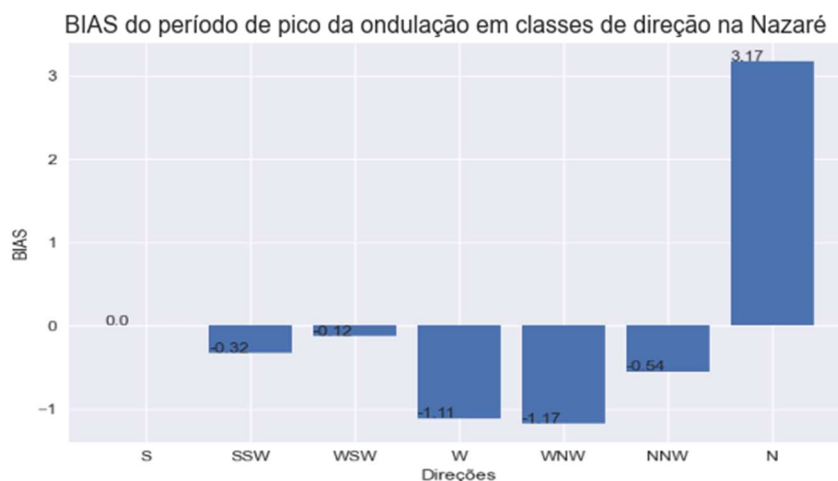


Figura 2-28: Representação do *bias* da *Tp* em classes de direção na costa da Nazaré.

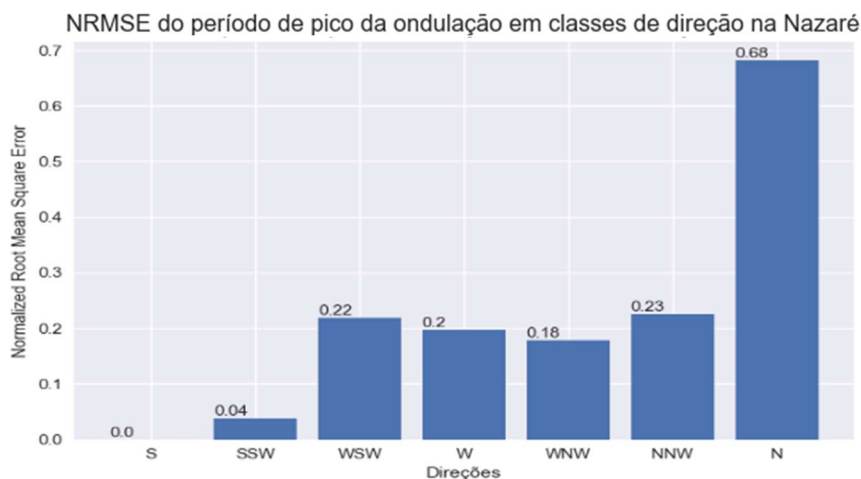


Figura 2-29: Representação do *NRMSE* da T_p em classes de direção na costa da Nazaré.

2.3 Portimão

O porto de Portimão, ao contrário dos portos referidos anteriormente, é um porto situado na costa Sul portuguesa e, por conseguinte, é expectável um comportamento diferente da ondulação relativamente aos portos já analisados. É importante salientar que a boia oceânica de Faro dista aproximadamente 40 NM da malha do modelo e se encontra localizada a uma profundidade acima dos 1300 m, podendo deste modo influenciar negativamente a avaliação do desempenho.

As figuras 2-30 e 2-31 representam histogramas polares da H_s e do T_p , respetivamente. Através da análise das mesmas, constata-se que a grande maioria da ondulação, cerca de 75%, registada pela boia oceânica de Faro tem origem no setor WNW. Com menor expressão, representando os restantes 25%, é visível ondulação dos setores de W e ESE (Este-sudeste). Observa-se, no geral, H_s menores em comparação com os portos da costa W, sendo que aproximadamente de 70% dos registos são inferiores a 2,0 m. Nota-se que toda a agitação marítima do setor de ESE está associada a fenómenos de vaga, levante, com T_p inferiores a 10 s.

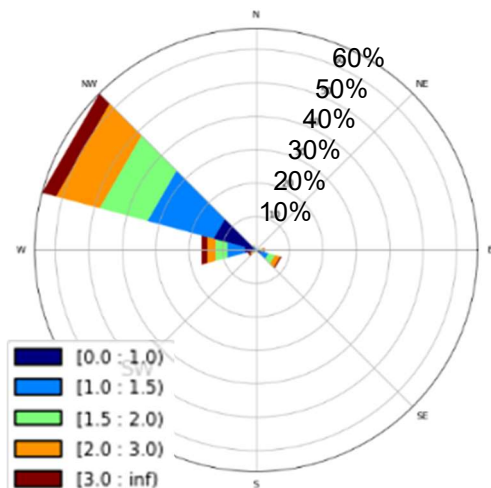


Figura 2-30: Histograma polar da H_s da ondulação registada pela boia de Faro oceânica.

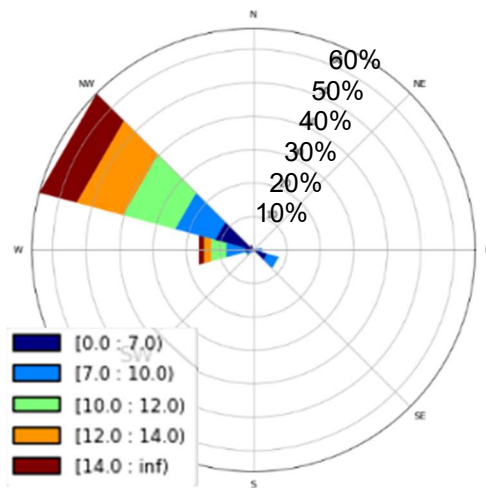


Figura 2-31: Histograma polar do período de pico da ondulação registada pela boia de Faro oceânica.

Na tabela 2-13 estão para os quatro parâmetros em estudo, a H_s , o $Tm02$, o Tp e a $PkDir$, representados o valor médio, σ e o valor máximo, exceto para a $PkDir$, da boia de Faro Oceânica e respetivo ponto do modelo. Comparando os dados estatísticos resultantes das observações da boia de Faro com os registos das boias da costa Oeste (tabela 2-1 e 2-7), verificam-se H_s ligeiramente menores e períodos de menor duração.

Não obstante as pequenas diferenças entre os valores médios registados pela boia da costa S e os registados pelas boias na costa W, constata-se diferenças consideráveis entre os dados apresentados pela boia e pelo modelo em Faro. Como era antecipado pela figura 2-1, verifica-se uma elevada subestimação da H_s , verificando-se uma diferença de quase 1,0 m entre os valores médios. Também se observa a subestimação dos parâmetros $Tm02$ e Tp onde se observa uma diferença de quase 1,5 s e 2,0 s, respetivamente, entre a boia e o modelo. No que diz respeito aos valores máximos, as diferenças acentuam-se para a H_s e para o Tp .

Relativamente à $PkDir$, destaca-se a grande diferença entre os valores médios. Devido à sua localização, a ondulação proveniente do Atlântico Norte observada pela boia oceânica de Faro, não sofreu os efeitos de refração. O modelo, e corretamente, já apresenta uma direção de pico orientada perpendicularmente à linha de costa.

Tabela 2-13: Estatísticas da costa de Portimão, comparação os dados gerados pelo modelo e os registados pela boia.

Variáveis	Boia			Delft3D		
	Média	σ	Máximo	Média	σ	Máximo
Hs (m)	1,70	1,23	7,15	0,82	1,02	4,57
Tm02 (s)	5,95	1,73	13,83	4,51	1,86	13,28
Tp (s)	10,03	2,75	25,08	8,94	2,24	20,00
PkDir (°)	269,63	20,49	-	174,94	41,15	-

Na tabela 2-14 são apresentados três parâmetros estatísticos que correlacionam a informação obtida pela boia e pelo modelo, são eles o índice de correlação, a raiz quadrada do erro quadrático médio e o viés. Os valores do índice de correlação são num cômputo geral inferiores aos apresentados na tabela 2-2 e 2-8 referente aos dados de Vila do Conde e Nazaré, respetivamente. Conclui-se que a correlação dos dados da *Hs* é forte, fraca para o *Tm02* e moderada para o *Tp*.

Do mesmo modo, o *RMSE* apresenta valores elevados comparativamente com as estações anteriores sendo que, a *Hs* e o *Tp* apresentam quase o dobro do erro das estações de Oeste.

O *bias* apresenta um valor negativo em todos os parâmetros, indicando novamente a subestimação dos dados calculados pelo modelo.

Tabela 2-14: Correlação, raiz do erro quadrático e viés entre os dados gerados pelo modelo e as observações da boia, para todo o período em Portimão.

Variáveis	r	RMSE	bias
Hs (m)	0,69	1,08	- 0,87
Tm02(s)	0,33	2,62	- 1,44
Tp (s)	0,48	4,14	- 1,10

As figuras 2-32 e 2-33 representam os diagramas de dispersão da *Hs* e do *Tm02* em Portimão estando também presente a reta de melhor ajuste dos dados. Analisando a figura 2-32 observa-se que a reta resultante dos conjuntos de dados apresenta um declive (0,45), valor consideravelmente inferior em comparação com as retas presentes nos diagramas de dispersão da *Hs* de Vila do Conde e Nazaré (figura 2-4 e 2-18), indicando um elevado aumento da subestimação com o aumento da *Hs*. Comparando

o posicionamento das duas retas verifica-se a subestimação dos dados para todos os valores de H_s . Visualmente, observa-se uma maior dispersão dos dados para valores mais elevados de H_s .

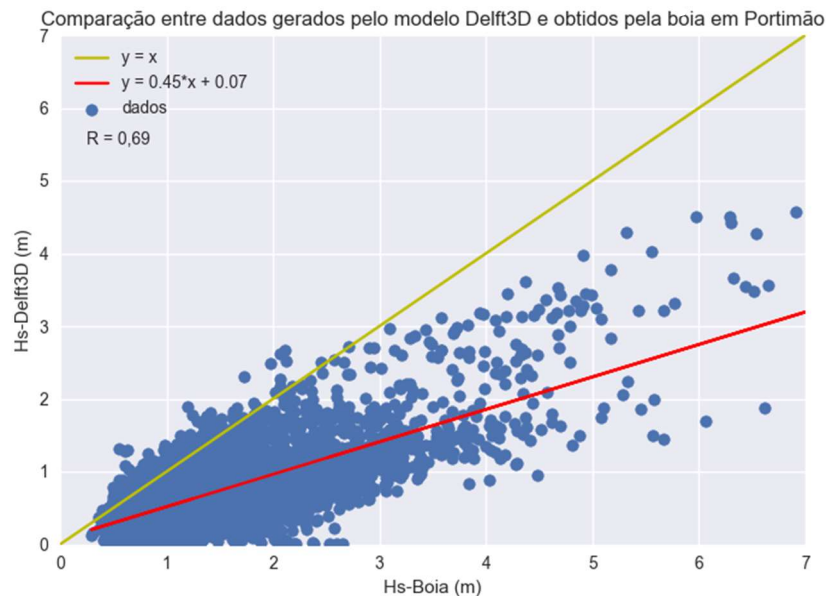


Figura 2-30: Diagrama de dispersão da altura significativa (H_s) entre os dados calculados pelo modelo e recolhidos pela boia na costa de Portimão.

Relativamente ao diagrama de dispersão do $Tm02$ em Portimão, verifica-se visualmente uma elevada dispersão dos dados, com uma correlação entre os dados fraca, de valor 0,33, deduzindo-se o elevado erro no cálculo deste parâmetro. Com recurso a ambas as retas, deduz-se a subestimação dos dados para todos os valores de $Tm02$ e através do declive da reta (0,48) deduz-se um aumento significativo da subestimação com o aumento dos valores do $Tm02$.

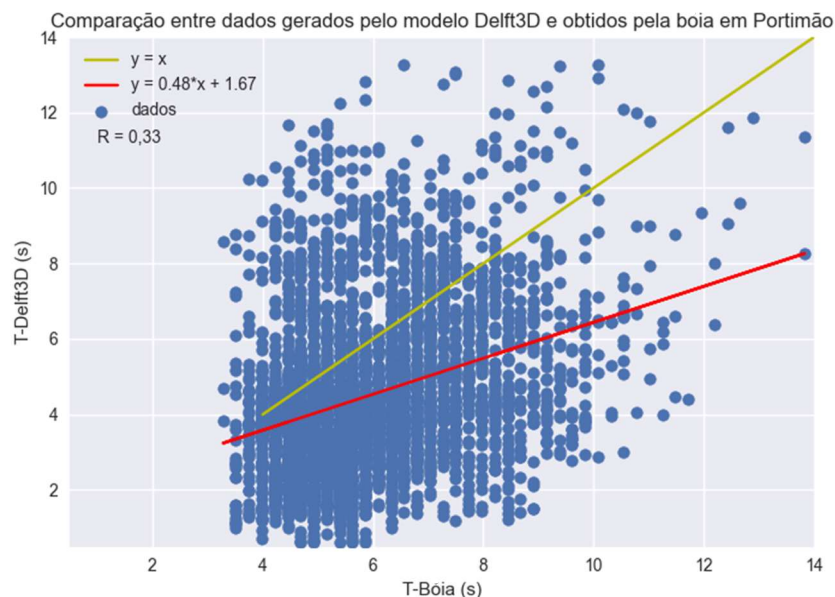


Figura 2-31: Diagrama de dispersão do período médio (T_{m02}) entre os dados calculados pelo modelo e recolhidos pela boia na costa de Portimão.

As figuras 2-34 a 2-39 representam, em gráficos de barras, o enviesamento e a raiz do erro quadrático normalizado para os parâmetros da H_s , T_{m02} e T_p em classes do parâmetro em análise. Nas tabelas 2-15, 2-16 e 2-17 está presente o número de amostras das classes da H_s , T_{m02} e T_p , respetivamente.

Tabela 2-15: Número de amostras das classes de H_s em Faro.

Classe	Registos
< 1	744
1 a 1,5	1150
1,5 a 2	824
2 a 3	728
> 3	295

O enviesamento e o $NRMSE$ entre o modelo e a boia por classes de H_s são apresentados nas figuras 2-34 e 2-35, respetivamente. No seguimento da análise da figura 2-1 e do diagrama de dispersão da H_s (figura 2-32), verifica-se em todas as classes subestimação dos dados por parte do modelo com um valor do erro aproximadamente uniforme de 60%. O enviesamento aumenta linearmente com o aumento da H_s para as classes inferiores a 3 m. Para a classe associada a eventos mais energéticos, estabelecida para valores registados pela boia de H_s superior a 3 m, o enviesamento é superior com um valor absoluto de quase 2 m e um erro de 54%.

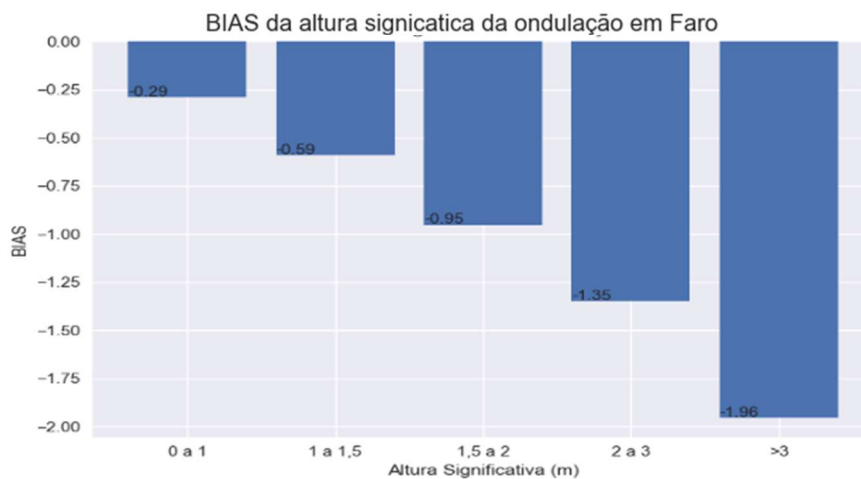


Figura 2-32: Representação do *bias* da H_s em classes de H_s na costa de Faro.

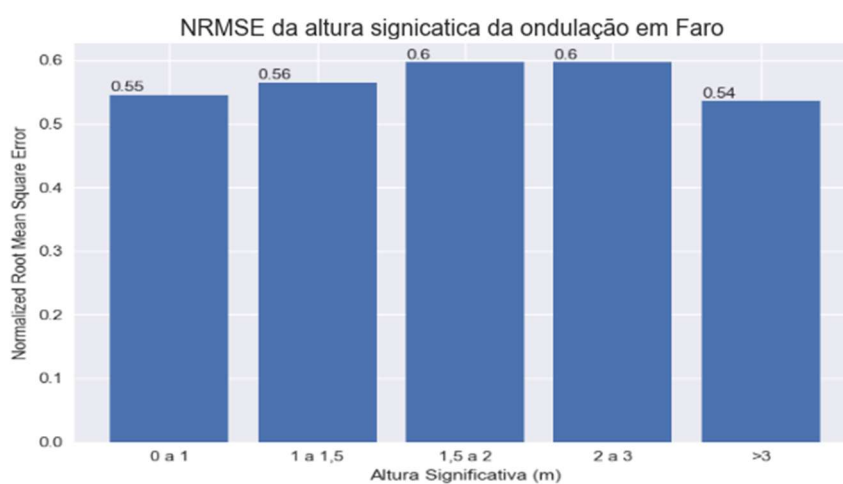


Figura 2-33: Representação do *NRMSE* da H_s em classes de H_s na costa de Faro.

Tabela 2-16: Número de amostras das classes de $Tm02$ em Faro.

Classe	Registos
< 5	1187
5 a 6	1043
6 a 7	652
7 a 8	482
> 8	377

Nas figuras 2-36 e 2-37 são apresentados o enviesamento e a raiz do erro quadrático normalizado, respetivamente, entre o modelo e boia por classes do $Tm02$.

Corroborando as conclusões retiradas da análise do diagrama de dispersão do $Tm02$ (figura 2-33) verifica-se a subestimação da variável em todas as classes com um valor do erro a variar entre os 39% e os 45%. Verifica-se novamente o aumento linear do enviesamento excetuando a classe de períodos mais longos, maiores que 8 s, onde o valor absoluto do enviesamento é de mais de 3 s e o $NRMSE$ de 44%.

Em comparação com as representações do $NRMSE$ do $Tm02$ para os portos de Leixões e Nazaré, figura 2-9 e 2-23 respetivamente, denota-se o maior valor do erro em Faro, sendo que o maior erro para os portos da costa Oeste é de 27% e o menor erro verificado no porto da costa Sul é de 39%, aproximadamente mais 10%.

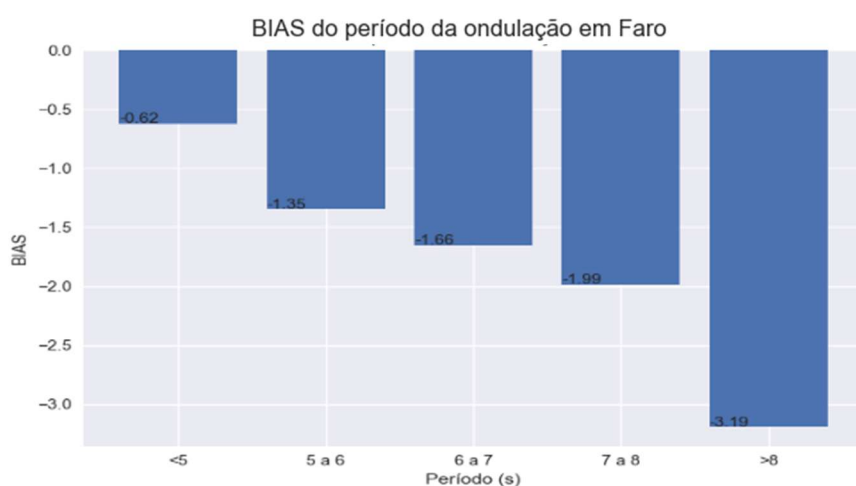


Figura 2-34: Representação do *bias* do $Tm02$ em classes de $Tm02$ na costa de Faro.

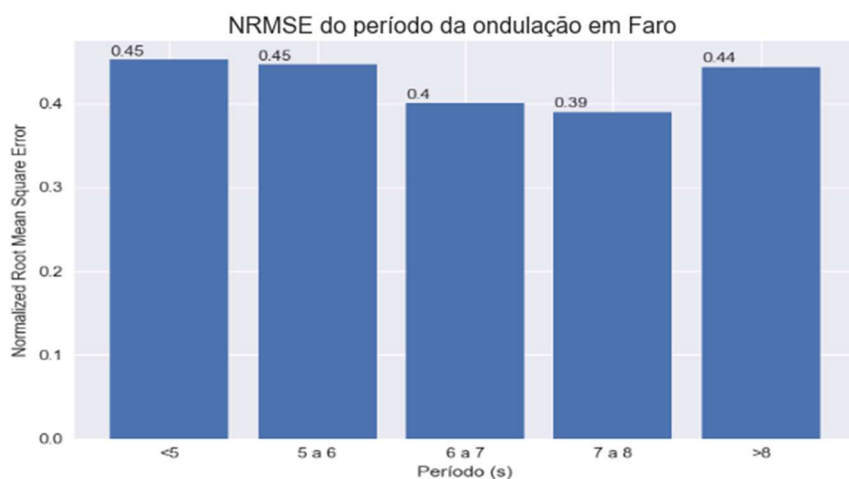


Figura 2-35: Representação do $NRMSE$ do $Tm02$ em classes de $Tm02$ na costa de Faro.

Tabela 2-17: Número de amostras das classes de T_p em Faro.

Classe	Registos
< 7	886
7 a 10	934
10 a 12	787
12 a 14	627
> 14	507

A figura 2-38 e 2-39 apresentam o enviesamento e a raiz do erro quadrático normalizado, respetivamente, entre o modelo e a boia em classes de T_p . Conservando-se a tendência das representações do *bias* do T_p em Leixões e na Nazaré, figuras 2-10 e 2-24, também na representação em Faro se verifica a sobrestimação dos dados na classe associada aos eventos de vaga, T_p menores que 7 s, e a subestimação em todas as restantes classes. Para as classes centrais, de T_p superior a 7 s e inferior a 14 s, constata-se um aumento linear do enviesamento com erro aproximadamente uniforme de 40%. Na classe correspondente aos períodos mais longos observa-se o maior valor absoluto do enviesamento, aproximadamente 2,7 s, e o menor valor do erro de 31%. A classe associada à vaga local destaca-se por um erro significativo da ordem dos 70%. Novamente, estabelecendo o paralelismo entre as representações de Faro com as dos portos da costa Oeste, tal como acontece nas representações do *NRMSE* do T_p nos outros portos (figura 2-11 e 2-25) também em Faro o valor do erro se destaca pela sua magnitude na classe de menores períodos.

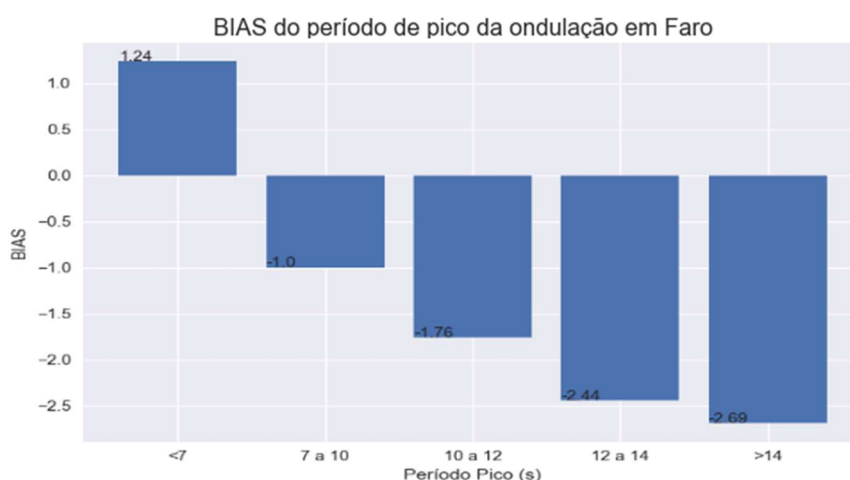


Figura 2-36: Representação do *bias* do T_p em classes de T_p na costa de Faro.

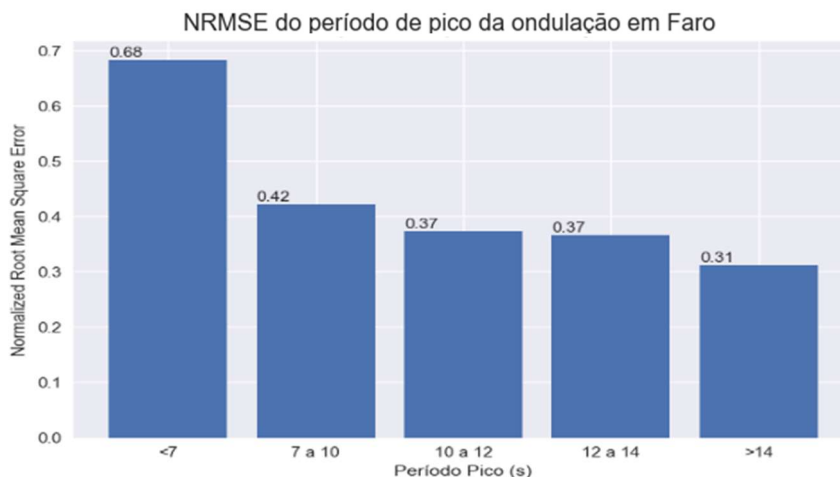


Figura 2-37: Representação do *NRMSE* do T_p em classes de T_p na costa de Faro.

Tendo em conta as condições oceanográficas dispares da costa Sul portuguesa foram seleccionadas diferentes direções, considerando o número de registos, para a realização da análise do modelo em função da direção da ondulação. As direções seleccionadas foram E (Este), ESE, SSW, WSW, W, WNW e NNW, perfazendo um total de 7 setores. Esta avaliação revela-se especialmente importante para esta estação pois, a região em questão possui um elevado dinamismo, comparativamente às outras duas estações cuja ondulação se verifica maioritariamente de NW, sendo que permitirá identificar a existência de algum fenómeno ou perturbação direcional que possa diminuir a performance do modelo.

Tabela 2-18: Número de registos por direção em Faro

Direções	E	ESE	SSW	WSW	W	WNW	NNW
Nº registos	99	288	36	96	625	2435	51

As figuras 2-40 a 2-43 apresentam os gráficos do *bias* e do *NRMSE* em classes de direção para os parâmetros da H_s e do T_p em Faro.

Nas figuras 2-40 e 2-41 estão representados o enviesamento e a raiz do erro quadrático normalizado da H_s registada pela boia e pelo modelo em classes de direção. No seguimento da informação apresentada na figura 2-32 e 2-34, o gráfico de dispersão da H_s e o *bias* da H_s em classes de H_s , respetivamente, observa-se subestimação dos dados em todas as direções. Verifica-se um erro a variar entre 28% e 69%. As direções com os valores do *NRMSE* mais elevados coincidem com as de maior enviesamento, sendo elas E, ESE, WNW e NNW, com um erro a rondar os 70% e um *bias* entre 0,8 m a 1,0 m. As direções de SSW e WSW são caracterizadas pelos menores erros do

conjunto das classes.

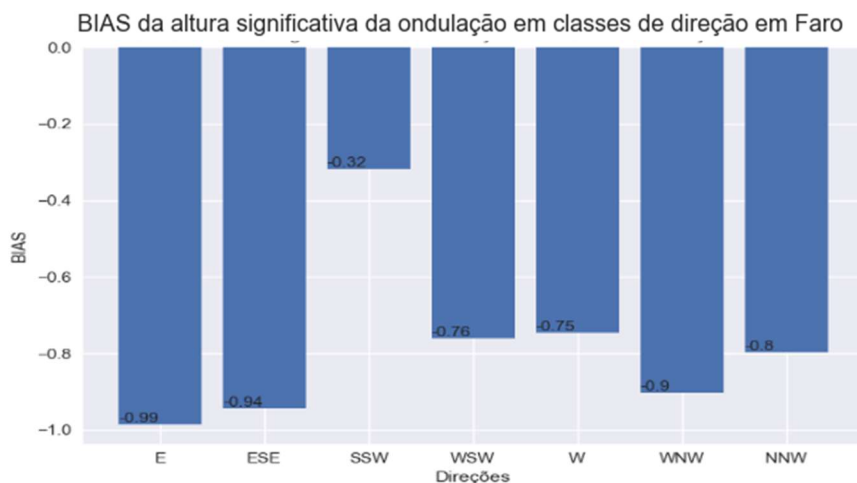


Figura 2-38: Representação do *bias* da *Hs* em classes de direção na costa de Faro.

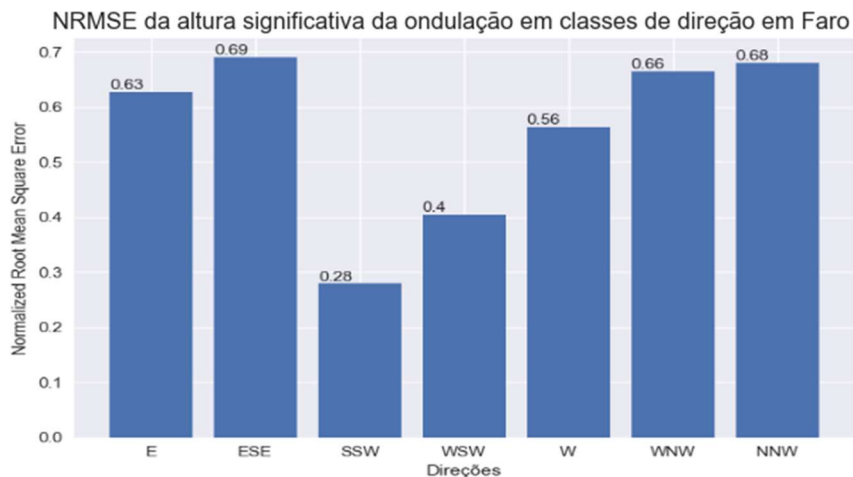


Figura 2-39: Representação do *NRMSE* da *Hs* em classes de direção na costa de Faro.

Por último, o enviesamento e a raiz do erro quadrático normalizado do T_p registado pelo modelo e pela boia em classes de direção são apresentados nas figuras 2-42 e 2-43, respetivamente. Analisando as representações, verifica-se a sobrestimação dos dados em cinco das sete direções em análise, sendo que em quatro o enviesamento é quase nulo. Nas classes de W e WNW, respetivas ao maior número de registos, verificam-se enviesamentos de aproximadamente -1,0 m e -1,5 m com um erro percentual a rondar os 40%. A direção de maior erro corresponde a NNW com um valor de *NRMSE* de 67% e o menor erro verifica-se novamente numa classe de SW, nomeadamente WSW, de 23%.

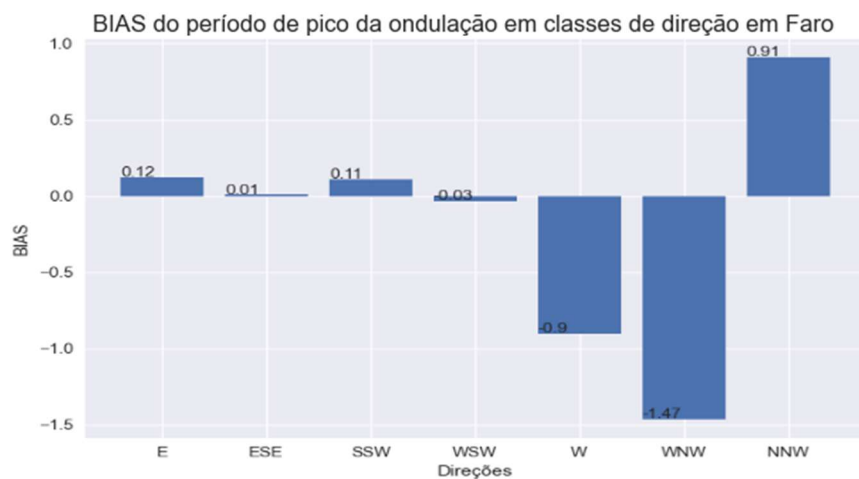


Figura 2-40: Representação do *bias* do T_p em classes de direção na costa de Faro.

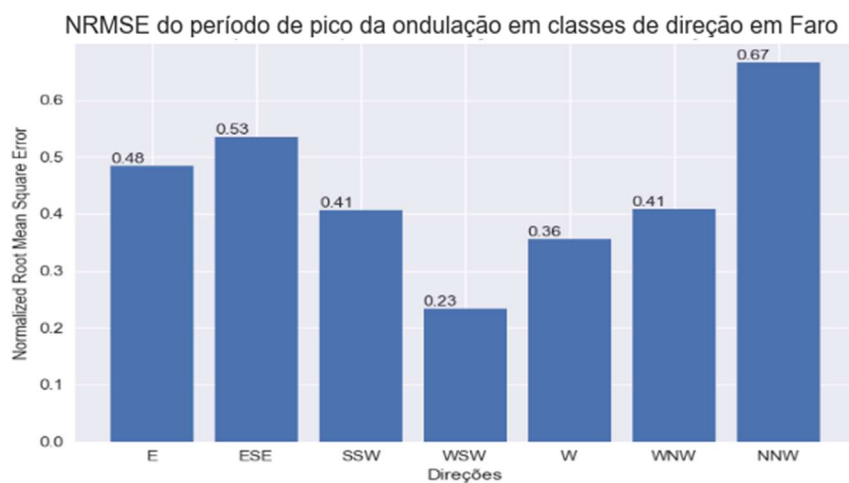


Figura 2-41: Representação do *NRMSE* do T_p em classes de direção na costa de Faro.

3. Discussão de Resultados

Após a análise dos dados, resultantes das comparações exercidas no capítulo anterior, neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos. Inicialmente serão abordados, em simultâneo, os portos da costa Oeste (Vila do Conde e Nazaré) e em seguida o porto da costa Sul (Portimão). Através da discussão pretende-se formular hipóteses que justifiquem os fenómenos analisados e elaborar conclusões relativas ao desempenho do modelo.

Como referido no capítulo 1 (secção 1.3), após a uniformização temporal dos dados resultaram apenas 2999, 2747 e 3741 registos simultâneos para Leixões, Nazaré e Faro, respetivamente. Tendo em conta que alguns dos fenómenos observados na costa portuguesa possuem uma periodicidade muito reduzida, salienta-se que o número de registos é reduzido para o desenvolvimento de uma análise robusta, limitando desta forma a elaboração de conclusões definitivas. Não obstante, será realizada a discussão dos resultados atribuindo a importância ponderada aos diferentes fenómenos.

Tendo em conta a proximidade geográfica e, por sua vez, as condições de agitação marítima observadas ao largo, na zona das boias, serem semelhantes os resultados analisados nos portos da costa Oeste, Leixões e Nazaré, serão discutidos em simultâneo.

Iniciando a discussão pela apreciação da primeira tabela em cada secção do capítulo 2 (tabelas 2-1 e 2-7), referente aos valores médios e máximos, é prontamente identificada a tendência global de subestimação do modelo. Esta propensão do modelo é sustentada pelas diferenças entre valores médios e máximos, à exceção do *Tm02* em Leixões. Este comportamento do modelo pode ser fundamentado pela insuficiência da resolução temporal e espacial do campo do vento utilizado no forçamento das condições de agitação marítima, resultando na suavização da solução numérica.

Comparando as tabelas 2-1 e 2-7, reconhece-se uma diminuta diferença entre os valores médios da *Hs* entre os portos da costa W, sendo no porto da Nazaré registados os valores mais elevados. Este fenómeno pode ser explicado através da ligeira diferença da orientação da linha de costa nos dois portos. Uma vez que a disposição da costa da Nazaré é aproximadamente perpendicular à direcção predominante da ondulação, WNW, verifica-se uma menor perda de energia das ondas devido ao fenómeno de refração. Em comparação, a costa de Vila do Conde obriga a

que as ondas se orientem com a costa, originando a perda de energia e consequentemente a redução da H_s .

Avançando para as segundas tabelas (tabelas 2-2 e 2-8), são apresentados os valores do r , do $RMSE$ e do $bias$. Uma vez estarem a ser comparadas variáveis que medem o mesmo parâmetro, e idealmente registariam dados iguais, infere-se que o r intrinsecamente é um indicador do bom desempenho do modelo. Em ambos os conjuntos de dados testemunham-se coeficientes de correlação elevados, superiores a 0,69, sendo que o parâmetro da H_s é o que apresenta os valores maiores seguido do $Tm02$ e do Tp . O $RMSE$, a menos que usado em comparações, não é uma boa métrica do desempenho do modelo. Normalizar o erro, possibilita a sua quantificação e assim melhorar a percepção do mesmo. Desta forma, o erro de cálculo para os parâmetros em análise situa-se entre os 18% e os 27%. No que diz respeito aos valores do $bias$, estes indicam-nos a tendência de subestimação do modelo à exceção do parâmetro do $Tm02$ em Leixões, muito influenciado pela agitação de períodos menores, associados às situações de vaga. Não obstante a informação transmitida, os valores do viés apresentam pouca magnitude. Com a exceção da H_s em Vila do Conde com um viés de 12% do valor médio e do $Tm02$ na Nazaré com um viés de 18%, os valores percentuais do viés são inferiores a 10%.

Relativamente aos diagramas de dispersão, especificamente da H_s (figuras 2-4 e 2-18), identifica-se a tendência de o modelo sobrestimar valores de H_s menores que 1,0 m. Em ambas as figuras, é verificado o aumento da tendência de subestimação com o aumento da H_s observada, para valores superiores a 1,0 m. Em congruência com a reduzida dispersão visual observada, os elevados índices de correlação conjugados com o valor do declive das retas sugerem globalmente um bom desempenho do modelo na previsão do parâmetro em questão.

Nos diagramas de dispersão do $Tm02$ (figuras 2-5 e 2-19), nomeadamente em Leixões, também é identificada uma tendência de sobrestimação dos valores inferiores a 8 s. A dispersão observada nas duas figuras é superior à verificada para a H_s . Não obstante os vários *outliers* e a mancha resultante da dispersão dos dados, novamente a conjugação dos valores dos declives das retas e do r indiciam um desempenho satisfatório do modelo.

No que diz respeito à divisão do modelo por classes do respetivo parâmetro, constata-se, à semelhança do que se observa nos diagramas de dispersão (figuras 2-4, 2-5, 2-18 e 2-19), uma sobrestimação do parâmetro de H_s (figuras 2-6 e 2-20) para

valores inferiores a 1,0 m e o aumento do enviesamento negativo para valores superiores, com particular significado para os eventos mais energéticos. Relativamente ao *Tm02* em Leixões (figura 2-8) é observada uma sobrestimação para valores inferiores a 8 s, maioritariamente associados a situações de vaga local.

Analizando a divisão em classes do *Tp* (figuras 2-10, 2-11, 2-2 e 2-25), constata-se em ambos os portos, que as classes de menor período, associadas a situações de vaga local, evidenciam sobrestimação dos dados e exibem um erro substancialmente maior que as restantes. Este comportamento singular pode ser justificado pela falta de resolução do modelo *WWIII*, responsável pelas condições de forçamento na região de fronteira do modelo *Delft3D*, e sobretudo pelos campos de vento que forçam os modelos de agitação marítima. O modelo *WWIII* é um modelo oceânico que utiliza ventos originados pelo ECMWF com uma resolução espacial de 0,1°. Desta forma, a insuficiente resolução dos dados meteorológicos, tanto espacial como temporal, tende a suavizar os campos de vento resultando numa descrição menos rigorosa das ondas geradas localmente. Esta limitação é mais visível nos estados de mar dominados por vaga local.

Ainda que, as boias dos portos da costa W se encontrem sob o efeito dos mesmos fenómenos de agitação marítima, a comparação dos parâmetros de onda não pode ser realizada diretamente em função das mesmas direções registadas. A aproximação das ondas à costa e consequente diminuição da profundidade, em virtude da distância e principalmente do diferente alinhamento do litoral, induz a refração e espalhamento da onda, provocando alterações na direção de propagação. Estas alterações resultam no alinhamento perpendicular do rumo da ondulação em relação à costa. Desta forma, identificamos que parte dos eventos de WSW na Nazaré (65 registos – tabela 2-12), correspondem aos eventos de SSW de Leixões (22 registos – tabela 2-6) e destacam-se das situações típicas e mais comuns procedentes dos quadrantes de NW. Verificam-se erros significativos nas direções mencionadas de 36% na Nazaré e 46% em Leixões. Novamente, a evidente falta de registos impossibilita a realização de uma análise mais robusta, no entanto com recurso aos dados apresentados, verificamos que poderão indiciar uma pior descrição dos fenómenos provenientes de W, SW comparativamente com os eventos mais comuns de NW.

O porto de Portimão, localiza-se na costa Sul portuguesa e como consequência são expectáveis condições de agitação marítima dissemelhantes dos portos da costa Oeste. Para a validação do modelo na costa Sul foram utilizados os dados observados

pela boia de Faro oceânica, que dista aproximadamente 40 NM da fronteira do modelo. Esta distância poderá influenciar negativamente a avaliação do mesmo, principalmente na agitação registada pela boia dos setores de NW, visto que a ondulação observada pela boia será muito díspar da observada na zona do modelo, devido ao fenómeno de refração e espalhamento das ondas nas zonas costeiras. Não obstante, existem poucos registos de orientação SW e SE impossibilitando, novamente, a realização de conclusões definitivas.

Iniciando a discussão dos resultados pelos valores médios e tecendo as devidas comparações com os portos em análise, observa-se que o estado do mar ao largo do porto de Portimão se caracteriza por valores de H_s , $Tm02$ e Tp ligeiramente menores que os registados na costa Oeste. Realizando uma análise sucinta à primeira tabela (tabela 2-13), verificam-se no geral valores relativamente dispares entre a boia e o modelo, diferenças usualmente associadas a um menor desempenho, mas que também podem ser justificados pelo facto da boia oceânica de Faro se encontrar em águas profundas num local onde a ondulação proveniente do Atlântico Norte não sofreu efeitos de refração e espalhamento. A análise mais detalhada, em classes, poderá esclarecer as questões relacionadas com performance do modelo, não obstante estará sempre associado o erro dos dados relativo à distância.

Analisando a segunda tabela da secção de Portimão (tabela 2-14), observam-se valores do índice de correlação consideravelmente menores em comparação com os outros portos em análise, sendo a H_s o único parâmetro com um r superior a 0,5. Relativamente ao $RMSE$, observa-se aproximadamente o dobro do erro verificado nos portos da costa Oeste. Normalizando o $RMSE$, verifica-se um erro percentual de 64%, 44% e 66% para a H_s , $Tm02$ e Tp , respetivamente. Os valores do $bias$ indicam a elevada subestimação dos dados representado enviesamentos de grande magnitude, 51%, 24% e 11% novamente para a H_s , $Tm02$ e Tp , respetivamente.

A informação apresentada pelos diagramas de dispersão (figuras 2-32 e 2-33), corrobora a apresentada nas tabelas 2-13 e 2-14. Verifica-se para ambos os parâmetros, H_s e $Tm02$, uma elevada dispersão dos dados com a tendência de subestimação a aumentar com o aumento do parâmetro em análise.

À semelhança do que se verifica nos portos da costa Oeste, também em Portimão se denota a sobrestimação e um erro destacado nos fenómenos associados a vaga local, ou seja, na classe de menor Tp (figura 2-38 e 2-39). Verificada esta singularidade também nos registos de Portimão, corrobora a hipótese resolução

insuficiente dos campos de vento associados ao modelo *WWIII* que resulta na descrição menos rigorosa das ondas geradas localmente.

Relativamente à análise do modelo em classes de direção, verifica-se que o erro da H_s nas direções de SSW e WSW é menor (figura 2-41). Desta forma, observa-se um erro superior nas restantes direções associadas a ondulação proveniente do Atlântico e ao levante. O erro nesta situação é amplificado, não só pela distância da boia à malha do modelo, mas também pelas diferentes profundidades em que se encontram. O fenómeno de refração e espalhamento da ondulação é diretamente influenciado pela redução da profundidade verificada na aproximação à costa. Portanto, na zona do modelo, em profundidades intermédias, os estados de mar associados à ondulação proveniente do Atlântico e do levante sofrem refração e espalhamento antes de atingir a zona do porto de Portimão, diminuindo de forma significativa a altura de onda e alterando a direção. No entanto, esta atenuação de energia não é observada na boia oceânica de Faro pois esta encontra-se em águas profundas. Por outro lado, nos estados de mar provenientes de SW, verifica-se um acordo razoável entre os registos da boia e do modelo. Neste caso, a ondulação proveniente deste setor não sofre refração significativa, pois a sua direção já se encontra aproximadamente alinhada com a linha costeira, resultando por isso num erro inferior.

Aos estados de mar referentes às situações de levante, provenientes dos setores de SE, soma-se o erro associado à insuficiente resolução dos dados meteorológicos utilizados pelo modelo. Uma vez que o levante é um fenómeno de geração local associado aos fenómenos de vaga, a baixa resolução do modelo pode resultar na descrição menos rigorosa das ondas geradas localmente e desta forma do próprio levante.

3.1 Comparação dos resultados com outros estudos

Com o intuito de validar a performance do modelo em análise, realizaram-se comparações entre os resultados obtidos nesta tese com os resultados obtidos noutros trabalhos semelhantes.

No estudo de Silva et al. (2009) é realizada uma validação de um sistema de previsão de ondas para a costa portuguesa baseado nos modelos *WWIII* e *SWAN*. O processo de validação é semelhante ao realizado neste trabalho, sendo este através de comparações com os registos de boias costeiras, nomeadamente a de Leixões. À

semelhança do que se verifica na presente tese, também no trabalho em análise se concluiu uma tendência geral de subestimação dos valores da H_s . Na sua análise de Leixões calculou um $RMSE$ de 0,58 m e um $bias$ de -0,38 m. Comparando com os resultados obtidos na presente tese, verificam-se diferenças quase nulas em ambos os parâmetros estatísticos, indiciando um desempenho semelhante e igualmente positivo com o do sistema apresentado.

No mesmo âmbito, também o trabalho de Soares et al. (2011) tem por objetivo a validação de um sistema de previsão de vento e ondas baseado nos modelos *WAM* (*WAve prediction Model*) e *SWAN*, com recurso aos registos a boias costeiras para a validação das previsões da agitação marítima. No estudo identificado são analisadas quatro previsões, entre um e quatro dias, em Sines e Leixões. À semelhança do estudo referido anteriormente de Silva et al. (2009), também neste se verifica uma tendência de subestimação dos valores da H_s e do $Tm02$. Comparando os resultados obtidos por Soares et al. (2011) com os calculados na presente tese, verificam-se valores do índice de correlação e do $RMSE$ semelhantes, indiciando desempenhos positivos em ambos os trabalhos, sustentados pelos valores de $RMSE$ inferiores a 0,6 e de r superiores a 0,9.

Em suma, os erros obtidos pelo modelo em análise são da mesma ordem de grandeza dos calculados em outras validações similares, verificando-se desta forma um desempenho positivo.

Conclusão

A realização desta dissertação tem como principal objetivo é validar as condições de forçamento de agitação marítima do modelo *Delft3D*, correspondentes às soluções obtidas pelo modelo *WWIII*, com recurso a dados *in-situ* registados por estações localizadas ao longo da costa portuguesa. A fim de atingir o objetivo proposto foram selecionadas três boias, a boia de Leixões costeira, a boia da Nazaré costeira e a boia oceânica de Faro, responsáveis pelo registo dos parâmetros e onda. A validação do modelo foi conseguida através da comparação de dados das boias e do modelo, resultando na avaliação do desempenho do mesmo, fundamentalmente na sua competência para estimar os parâmetros considerados basilares noajuizamento do estado do mar. São eles a *Hs*, o *Tm02*, o *Tp* e a *PkDir*.

O *Delft3D*, é um sistema de modelos constituído por vários modelos, sendo um deles responsável pelo cálculo da agitação marítima, o *Delft3D-WAVE*. Este realiza previsões numa área e por forma diminuir o erro associado à distância entre as boias e a malha do modelo, foram selecionados os nós mais próximos das estações. Nos portos da costa Oeste as distâncias foram relativamente curtas, sendo de aproximadamente 4 NM e 0,1 NM em Vila do Conde e na Nazaré, respetivamente. Na costa sul, os únicos dados disponíveis eram os da boia oceânica de Faro, sendo a menor distância entre o modelo e boia de 40 NM.

A análise dos dados e por sua vez a comparação entre eles só é exequível após uma homogeneização temporal, onde resultam apenas registos simultâneos. Assim, devido à descontinuidade temporal das simulações do modelo e dos períodos inoperacionais das boias, apenas estão disponíveis 2999, 2747 e 3741 registos em Vila do Conde, Nazaré e Faro, respetivamente. O número francamente reduzido de dados em cada estação limita a realização de uma análise robusta e de conclusões definitas, sendo esta a principal dificuldade sentida nesta tese.

Na análise dos dados foram apresentadas análises estatísticas, correspondentes a apenas um ou aos dois conjuntos de dados, e produzidos diferentes gráficos que correlacionam e comparam a informação. Nomeadamente, foram calculados os valores médios e máximos de todos os parâmetros em análise e os respetivos índices de correlação, raiz do erro quadrático médio e o viés. As representações gráficas efetuadas foram diagramas de dispersão da *Hs* e do *Tm02* e

gráficos de barras onde se compararam os parâmetros por classes ou em função da direção de pico associada.

A discussão dos resultados foi dividida em duas partes, sendo primeiramente efetuada para os portos da costa Oeste, devido à similaridade das condições de agitação marítima observadas ao largo e da sua proximidade geográfica, seguida pela discussão referente à costa Sul. Relativamente à discussão de resultados obtidos para o porto de Portimão, esta revelou-se mais complexa devido à grande distância entre a boia e o modelo, às diferentes profundidades associadas e à maior diversidade de direções de propagação da ondulação. As conclusões realizadas para a costa Sul foram substancialmente limitadas pelo reduzido número de registos e pela concentração dos mesmos nas direções de W e WNW.

Desta forma, após a discussão dos resultados, relativamente ao desempenho do modelo conclui-se que este:

- Apresenta uma tendência geral de subestimação em todos os parâmetros;
- Tende a sobrestimar os valores de H_s menores;
- Tende a sobrestimar os menores valores do T_p , associados às situações de vaga local, devido à insuficiente resolução espacial dos campos de vento que forçam o modelo *WWIII*;
- Tende a apresentar um maior enviesamento nas soluções obtidas para os eventos extremos.

Relativamente à avaliação do modelo em função da direção da agitação marítima, na costa Oeste não é possível concluir definitivamente nenhum padrão de desvios associado a algum setor, no entanto identifica-se a possibilidade de o modelo descrever pior os eventos de ondulação provenientes de W, SW.

Avaliando o modelo, principalmente através dos resultados obtidos na costa W, verificam-se no geral correlações elevadas entre os dados, superiores a 0,7, e um enviesamento percentual a rondar os 10%, considerado positivo tendo em conta o propósito do modelo. Sustentando a avaliação através das comparações realizadas na secção 3.1, verifica-se que o desempenho obtido pelo modelo em análise se encontra dentro do padrão, igualando os desempenhos positivos verificados em outras validações do modelo. Deste modo, durante o período temporal de amostragem, os resultados

obtidos estão de acordo com as tendências de agitação marítima observadas na costa portuguesa.

Por forma a melhorar o desempenho do modelo, sugere-se a utilização de campos de ventos locais de maior resolução com o intuito de melhorar a previsão das situações de vaga. A subestimação dos valores da H_s poderia ser melhorada com uma melhor resolução espacial e temporal dos ventos globais, no entanto depende da disponibilidade destas soluções. Por outro lado, poderia ser realizada uma recalibração do *WWIII*, de modo a adequar o seu desempenho ao regime de ondas gerados na bacia do Atlântico Norte, porém esta afinação não garante a melhoria da previsão em todos os parâmetros, podendo inclusive resultar no abaixamento de performance.

Em trabalhos futuros sugere-se a validação dos dados da corrente, através da comparação dos dados registados pelo HF Radar.

Referências bibliográficas

- Abdi, H. (2007). The Kendall rank correlation coefficient. *Encyclopedia of measurement and statistics*, 2, 508-510.
- Almeida, L. P., Ferreira, Ó., Voudoukas, M. I., & Dodet, G. (2011). Historical variation and trends in storminess along the Portuguese South Coast. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(9), 2407-2417.
- Andrade, C., Pires, H., Silva, P., Taborda & Freitas, M. (2006). Zonas Costeiras. Em Santos, F. D., Miranda, P. (Eds.), *Alterações Climáticas em Portugal Cenários Impactos e Medidas de Adaptação* (pp. 169-169). Lisboa, Portugal: Gradiva.
- Booij, N. R. R. C., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of geophysical research: Oceans*, 104(C4), 7649-7666.
- Carson, J.S. (2002). Model verification and validation. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 1, 52-58 vol.1.
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE). *Geoscientific Model Development Discussions*, 7(1), 1525-1534.
- Cherneva, Z., Andreeva, N., Pilar, P., Valchev, N., Petrova, P., & Soares, C. G. (2008). Validation of the WAMC4 wave model for the Black Sea. *Coastal Engineering*, 55(11), 881-893.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). New York: Psychology Press.
- Cook, D. A., & Skinner, J. M. (2005). How to perform credible verification, validation, and accreditation for modeling and simulation. *The Journal of Defense Software Engineering*, 18(5), 20-24.
- Costa, M., Silva, R., & Vitorino, J. (2001). Contribuição para o estudo do clima de agitação marítima na costa portuguesa. *2ª Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, 20.
- Datawell BV (2019). Datawell Waverider Manual.
- Deltares. (n.d.). *About Delft3D*. <https://oss.deltares.nl/web/delft3d/about>
- Elias, E. P. L., Walstra, D. J. R., Roelvink, J. A., Stive, M. J. F., & Klein, M. D. (2001). Hydrodynamic validation of Delft3D with field measurements at Egmond. In *Coastal Engineering Conference*, 3, 2714-2727.
- Faria, C. S. G. (2009). Previsão da agitação marítima na Costa Noroeste Portuguesa: implementação do modelo SWAN. (Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto)
- Fernandes, A. F. (2020). *Avaliação de um Modelo Espectral de Previsão de Agitação*

- Marítima para a Costa Oeste de Portugal*. (Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro)
- Gil, J. P. dos S. (2014). *Application of the Delft3D System in the Modelling of Laboratory and Field Longshore Currents* Civil Engineering Examination Committee. (Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico).
- Hsu, Y. L., DYkes, J. D., Allard, R. A., & Wang, D. W. (2008). *Validation test report for Delft3D*.
- IH. (n.d.). *Rede de Boias*. <https://www.hidrografico.pt/boias>
- IMOS. (n.d.). *Wave Buoys*. <https://imos.org.au/facilities/nationalmooringnetwork/wave-buoys>
- Instituto Hidrográfico (2015). *Roteiro da Costa de Portugal do Rio Minho ao Cabo Carvoeiro*, (4).
- Jakimavičius, D., Kriaučiūnienė, J., & Šarauskienė, D. (2018). Assessment of wave climate and energy resources in the Baltic Sea nearshore (Lithuanian territorial water). *Oceanologia*, 60(2), 207-218.
- Lo Re, C., Manno, G., Ciraolo, G., & Besio, G. (2019). Wave energy assessment around the Aegadian Islands (Sicily). *Energies*, 12(3), 333.
- Jerónimo, J. A. M. (2021). *Análise Comparativa entre diferentes fontes de dados oceanográficos para a região da Macaronésia*. (Tese de Mestrado, Escola Naval)
- Kleissl, J. (2013). Conventional Metrics for Model Evaluation, *Solar energy forecasting and resource assessment*. Academic Press.
- Kotz, S., Balakrishnan, N., Read, C. B., & Vidakovic, B. (2005). *Encyclopedia of Statistical Sciences, Volume 1*. John Wiley & Sons.
- Laerd Statistics (2020). Pearson's product moment correlation. *Statistical tutorials and software guides*. <https://statistics.laerd.com/statistical-guides/pearson-correlation-coefficient-statistical-guide.php>
- Levine, D. M., & Stephan, D. F. (2015). *Even you can learn statistics and analytics: A easy to understand guide to statistics and analytics* (3ª Edição). Pearson Education.
- Madeira, F., Alves, M., Pinto, J. P., Guerreiro, R., Almeida, N., & Almeida, S. (2019). *Desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à tomada de decisão sobre a praticabilidade das barras*. Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Instituto Superior Técnico.
- Madeira, F. (2021). Relatório Progresso de Trabalhos – REL TF OC 06/21.
- Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., & Mazzino, A. (2013). Problems in RMSE-based wave model validations. *Ocean Modelling*, 72, 53-58.
- (2015). Performance evaluation of Wavewatch III in the Mediterranean Sea.

Ocean Modelling, 90, 82-94.

Middha, P., Hansen, O. R., Grüne, J., & Kotchourko, A. (2007). Validation of CFD calculations against ignited impinging jet experiments.

Mota, P., & Pinto, J. P. (2014). Wave energy potential along the western portuguese coast. *Renewable Energy*, 71, 8-17.

Nicolau, L., Vasconcelos, P., Carvalho, A. N., Pereira, F., Piló, D., Sordo, L., & Gaspar, M. B. (2021). Hand dredging for the wedge clam (*Donax trunculus*) in the Algarve coast (southern Portugal): fishing yield, bycatch, discards and damage rates. *Marine Biology Research*, 17(9-10), 960-977.

Paillard, M., Prevosto, M., Barstow, S. F., & Soares, C. G. (2000). Field measurements of coastal waves and currents in Portugal and Greece. *Coastal engineering*, 40(4), 285-296.

Queensland Government. (2022). *Wave monitoring: Glossary*.
<https://www.qld.gov.au/environment/coasts-waterways/beach/monitoring/waves-glossary>

Ribeiro, J., Silva, A. J. R., & Leitão, J. C. (2009). Modelos Operacionais de previsão da agitação para suporte à navegação e gestão de riscos. *6as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, 22-38.

Sangalugeme, C., Luhunga, P., Kijazi, A., & Kabelwa, H. (2018). Validation of operational WAVEWATCH III wave model against satellite altimetry data over South West Indian Ocean off-coast of Tanzania. *Applied Physics Research*, 10(4), 55.

Sargent, R. G. (2010). Verification and validation of simulation models. *Proceedings of the 2010 winter simulation conference*, 166-183.

Shevlyakov, G. L., & Oja, H. (2016). *Robust correlation: Theory and applications* (Vol. 3). John Wiley & Sons.

Silva, F. S., Pinto, J. P., & Almeida, S. (2009). Operational wave forecasting system for the Portuguese coast. *Journal of Coastal Research*, 1055-1059.

Soares, C. G., Rusu, L., Bernardino, M., & Pilar, P. (2011). An operational wave forecasting system for the Portuguese continental coastal area. *Journal of Operational Oceanography*, 4(2), 17-27.

Swellnet Analysis. (2018). How do wave buoys work?.
<https://www.swellnet.com/news/swellnet-analysis/2018/10/23/know-your-product-how-do-wave-buoys-work>

Texas Education Agency. (n.d). *Scientific Models*.
<https://www.texasgateway.org/resource/scientific-models>

Veeramony, J., Condon, A., Linzell, R., & Watson, K. (2016). *Validation of Delft3D as a Coastal Surge and Inundation Prediction System*.

Apêndice A - Processo de obtenção do ficheiro dos dados do modelo

```
1 from netCDF4 import Dataset, num2date, date2num
2 import pandas as pd
3 import numpy as np
4
5 #Ler o ficheiro NETCDF
6 data = Dataset(r'E:\Tese\DADOS\DADOS\Nazare\wavm-gmnz_201909.nc', 'r')
7
8 #Definir a variável tempo e os parâmetros a extrair
9 with Dataset(r'E:\Tese\DADOS\DADOS\Nazare\wavm-gmnz_201909.nc', 'r') as root:
10     time = root.variables['time'][:]
11     dates = num2date(time, root.variables['time'].units)
12     unit_utchours = root.variables['time'].units.replace('seconds', 'hours')
13     utc_hours = date2num(dates, unit_utchours)
14 dat=[]
15 a= 0
16 while a<len(data.variables['time']):
17
18     years = (dates[a].strftime('%H %M %d %m %Y'))
19     a=a+1
20     dat.append(years)
21
22 #altura significativa
23 hsign=[]
24 a= 0
25 while a<len(data.variables['time']):
26     hs = data.variables['hsign'][a,6,1]
27     a=a+1
28     hsign.append(hs)
29
30 #Periodo (Mean absolute zero-crossing period)
31 tm02=[]
32 a= 0
33 while a<len(data.variables['time']):
34     perd = data.variables['tm02'][a,6,1]
35     a=a+1
36     tm02.append(perd)
37
38 #periodo de pico (Relative peak wave period)
39 rtp=[]
40 a= 0
41 while a<len(data.variables['time']):
42     tp = data.variables['rtp'][a,6,1]
43     a=a+1
44     rtp.append(tp)
45
46 #Direcao de pico
47 pdir=[]
48 a= 0
49 while a<len(data.variables['time']):
50     thtp = data.variables['pdir'][a,6,1]
51     a=a+1
52     pdir.append(thtp)
53
54 #Criar o ficheiro excel a exportar
55 list_of_tuples = list(zip(hsign,tm02,rtp,pdir))#lista de colunas
56 df = pd.DataFrame(list_of_tuples, columns= ['hsign','Periodo','periodo do
57 pico','Direcao de pico'], index = dat)
58 df.to_csv('Var_comp_modelo_1909.txt')
```


Apêndice B – Código da coluna de tempo e homogeneização temporal

```
1 import pandas as pd
2
3 # Carregar os ficheiros com os dados das bóias e do modelo
4 modelo = pd.read_csv('Modelo.csv')
5 boia = pd.read_csv('Boia.csv')
6
7 #Criação da coluna referente à data dos acontecimentos (datetime)
8 cols=["HORA", "MIN", "DIA", "MES", "ANO"]
9 modelo['date'] = modelo[cols].apply(lambda x: '-'.join(x.values.astype(str)),
    axis="columns")
10 modelo['date']=pd.to_datetime(modelo['date'], format= '%H-%M-%d-%m-%Y')
11 boia['date'] = boia[cols].apply(lambda x: '-'.join(x.values.astype(str)),
    axis="columns")
12 boia['date']=pd.to_datetime(boia['date'], format= '%H-%M-%d-%m-%Y')
13
14 # Eliminar os registos sem correspondência temporal
15 boia = boia[boia['date'].isin(modelo['date'])]
16 modelo = modelo[modelo['date'].isin(boia['date'])]
17 boia = boia[boia['date'].isin(modelo['date'])]
```


Apêndice C – Código do gráfico da Altura Significativa em função do tempo

```
1 from matplotlib.lines import _LineStyle
2 import pandas as pd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import numpy as np
5
6 #Carregar os ficheiros da Nazaré
7 modeloN = pd.read_csv('ModeloN.csv')
8 boiaN = pd.read_csv('BoiaN.csv')
9
10 #Criação da coluna referente à data-tempo
11 cols=["HORA","MIN","DIA","MES","ANO"]
12 modeloN['date'] = modeloN[cols].apply(lambda x: '-'.join(x.values.astype(str)),
13 axis="columns")
14 boiaN['date'] = boiaN[cols].apply(lambda x: '-'.join(x.values.astype(str)),
15 axis="columns")
16
17 #homogeneização temporal
18 boiaN = boiaN[boiaN['date'].isin(modeloN['date'])]
19 modeloN = modeloN[modeloN['date'].isin(boiaN['date'])]
20 boiaN = boiaN[boiaN['date'].isin(modeloN['date'])]
21 modeloN = modeloN[modeloN['date'].isin(boiaN['date'])]
22
23 #Carregar os ficheiros de Portimão
24 modeloP = pd.read_csv('ModeloP.csv')
25 boiaP = pd.read_csv('Boia1P.csv')
26
27 #Criação da coluna referente à data-tempo
28 cols=["HORA","MIN","DIA","MES","ANO"]
29 modeloP['date'] = modeloP[cols].apply(lambda x: '-'.join(x.values.astype(str)),
30 axis="columns")
31 boiaP['date'] = boiaP[cols].apply(lambda x: '-'.join(x.values.astype(str)),
32 axis="columns")
33
34 #homogeneização temporal
35 boiaP = boiaP[boiaP['date'].isin(modeloP['date'])]
36 modeloP = modeloP[modeloP['date'].isin(boiaP['date'])]
37 boiaP = boiaP[boiaP['date'].isin(modeloP['date'])]
38 modeloP = modeloP[modeloP['date'].isin(boiaP['date'])]
39
40 #Carregar os ficheiros de Vila do Conde
41 modeloVC = pd.read_csv('ModeloSdupsVC.csv')
42 boiaVC = pd.read_csv('BoiaVC.csv')
43
44 #Apagar date e voltar a criar por causa de erro
45 del modeloVC['date']
46 del boiaVC['date']
47 cols=["HORA","MIN","DIA","MES","ANO"]
48 modeloVC['date'] = modeloVC[cols].apply(lambda x: '-'.join(x.values.astype(str)),
49 axis="columns")
50 boiaVC['date'] = boiaVC[cols].apply(lambda x: '-'.join(x.values.astype(str)),
51 axis="columns")
52
53 boiaVC['date'] = pd.to_datetime(boiaVC['date'], format= '%H-%M-%d-%m-%Y')
```

```

54 #Criação do Plot
55 fig, (ax1, ax2, ax3) = plt.subplots(3, sharex=True)
56
57 ax1.plot_date(boiaVC['date'], boiaVC['HSIGN'], markersize= 2, markeredgewidth=1,
58 label= "boia")
59 ax1.plot_date(modeloVC['date'], modeloVC['HSIGN'], markersize= 2, markeredgewidth=1,
60 label= "modelo")
61
62 ax2.plot_date(boiaN['date'], boiaN['HSIGN'], markersize= 2, markeredgewidth=1, label=
63 "boia")
64 ax2.plot_date(modeloN['date'], modeloN['HSIGN'], markersize= 2, markeredgewidth=1,
65 label= "modelo")
66
67 ax3.plot_date(boiaP['date'], boiaP['HSIGN'], markersize= 2, markeredgewidth=1, label=
68 "boia")
69 ax3.plot_date(modeloP['date'], modeloP['HSIGN'], markersize= 2, markeredgewidth=1,
70 label= "modelo")
71 ax3.tick_params(axis='x', labelsz=10, rotation = 45)
72
73 fig.suptitle('Altura Significativa da bóia e do modelo')
74 ax1.set_title('Leixões')
75 ax2.set_title('Nazaré')
76 ax3.set_title('Faro')
77 ax3.set_xlabel('Tempo (Ano-mês)')
78 ax1.set_ylabel('Hs (m)')
79 ax2.set_ylabel('Hs (m)')
80 ax3.set_ylabel('Hs (m)')
81 ax3.xticks([1, 2, 3, 4, 5])
82 ax1.legend()
83 fig.show()

```


Apêndice D – Código do histograma polar da altura significativa na Nazaré

```
1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 from windrose import WindroseAxes
4
5 #Carregar os dados da bóia da Nazaré
6 boia = pd.read_csv('Boia.csv')
7
8 #Mudar nome da coluna (Para ficar com uma palavra)
9 boia["Dir"] = boia["Dir Pico"]
10
11 #Definir intervalos das classes
12 bins_range = [0,1,2,3,4]
13
14 #Criação do gráfico
15 ax = WindroseAxes.from_ax()
16 ax.bar(boia.Dir, boia.HSIGN, normed=True, opening=1, nsector = 12, bins =
bins_range)
17 ax.set_xticklabels(['E', 'NE', 'N', 'NW', 'W', 'SW', 'S', 'SE'])
18 ax.set_yticks(np.arange(10, 60, step=10))
19 ax.set_yticklabels(np.arange(10, 60, step=10))
20 ax.set_legend()
```


Apêndice E – Código dos diagramas de dispersão da altura significativa na Nazaré

```
1 from matplotlib.lines import _LineStyle
2 import pandas as pd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import numpy as np
5
6 #Carregar os ficheiros da Nazaré
7 modelo = pd.read_csv('Modelo.csv')
8 boia = pd.read_csv('Boia.csv')
9 #Apagar date e voltar a criar por causa de erro
10
11 #Homogeneização temporal
12 cols=["HORA","MIN","DIA","MES","ANO"]
13 modelo['date'] = modelo[cols].apply(lambda x: '-'.join(x.values.astype(str)),
14 axis="columns")
14 modelo['date']=pd.to_datetime(modelo['date'], format= '%H-%M-%d-%m-%Y')
15 boia['date'] = boia[cols].apply(lambda x: '-'.join(x.values.astype(str)),
16 axis="columns")
16 boia['date']=pd.to_datetime(boia['date'], format= '%H-%M-%d-%m-%Y')
17
18 boia = boia[boia['date'].isin(modelo['date'])]
19 modelo = modelo[modelo['date'].isin(boia['date'])]
20 boia = boia[boia['date'].isin(modelo['date'])]
21
22 #HSIGN
23 bhsign= boia['HSIGN']
24 mhsign= modelo['HSIGN']
25 #Coef correlação
26 my_rho = np.corrcoef(bhsign, mhsign)
27 print(my_rho)
28 #Criação do diagrama
29 plt.style.use('seaborn')
30 #Reta y=x
31 x= np.linspace(0,10,100)
32 y= x
33 plt.plot(x, y, 'y', label= "y = x")
34 #Reta de melhor ajuste
35 a, b = np.polyfit(bhsign, mhsign, 1)
36 plt.title('Comparação entre dados gerados pelo modelo Delft3D e obtidos pela bóia na
37 Nazaré')
38 plt.xlabel('Hs-Bóia (m)')
39 plt.ylabel('Hs-Delft3D (m)')
40 plt.axis ([0,10,0,10])
41 theta = np.polyfit(bhsign, mhsign, 1)
42 #Eq da reta
43 print(f'The parameters of the line: {theta}')
44 plt.text(0.4, 7.8, 'R = 0,89')
45 y_line = theta[1] + theta[0] * bhsign
46 plt.plot(bhsign, y_line, color='red',label = "y = 0.73*x + 0.43")
47 plt.scatter(bhsign,mhsign,label="dados")
48 plt.legend()
49 plt.show()
```


Apêndice F – Código dos gráficos do NRMSE e do Bias da altura significativa na Nazaré

```
1 import pandas as pd
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from sklearn.metrics import mean_squared_error
4 import math
5 import statistics
6 #Carregar ficheiros
7 modelo = pd.read_csv('Modelo.csv')
8 boia = pd.read_csv('Boia.csv')
9 #Homogeneização temporal
10 cols=["HORA","MIN","DIA","MES","ANO"]
11 modelo['date'] = modelo[cols].apply(lambda x: '-'.join(x.values.astype(str)),
12 axis="columns")
12 modelo['date']=pd.to_datetime(modelo['date'], format= '%H-%M-%d-%m-%Y')
13 boia['date'] = boia[cols].apply(lambda x: '-'.join(x.values.astype(str)),
14 axis="columns")
14 boia['date']=pd.to_datetime(boia['date'], format= '%H-%M-%d-%m-%Y')
15 boia = boia[boia['date'].isin(modelo['date'])]
16 modelo = modelo[modelo['date'].isin(boia['date'])]
17 boia = boia[boia['date'].isin(modelo['date'])]
18
19 #Criar as classes para a altura significativa
20 boia0 = boia[boia['HSIGN'].between(0,1)]
21 boia1 = boia[boia['HSIGN'].between(1.01,2)]
22 boia2 = boia[boia['HSIGN'].between(2.01,3)]
23 boia3 = boia[boia['HSIGN'].between(3.01,4)]
24 boia4 = boia[boia['HSIGN'] > 4]
25 mod0 = modelo[modelo['date'].isin(boia0['date'])]
26 mod1 = modelo[modelo['date'].isin(boia1['date'])]
27 mod2 = modelo[modelo['date'].isin(boia2['date'])]
28 mod3 = modelo[modelo['date'].isin(boia3['date'])]
29 mod4 = modelo[modelo['date'].isin(boia4['date'])]
30
31 Mhsign0 = mod0['HSIGN']
32 Mhsign1 = mod1['HSIGN']
33 Mhsign2 = mod2['HSIGN']
34 Mhsign3 = mod3['HSIGN']
35 Mhsign4 = mod4['HSIGN']
36
37 Bhsign0 = boia0['HSIGN']
38 Bhsign1 = boia1['HSIGN']
39 Bhsign2 = boia2['HSIGN']
40 Bhsign3 = boia3['HSIGN']
41 Bhsign4 = boia4['HSIGN']
42
43 #Calculo do NRMSE
44 MSE0 = mean_squared_error(Bhsign0, Mhsign0)
45 RMSE0= math.sqrt(MSE0)
46 NRMSE0= RMSE0/statistics.mean(Bhsign0)
47
48 MSE1 = mean_squared_error(Bhsign1, Mhsign1)
49 RMSE1= math.sqrt(MSE1)
50 NRMSE1= RMSE1/statistics.mean(Bhsign1)
51
52 MSE2 = mean_squared_error(Bhsign2, Mhsign2)
53 RMSE2= math.sqrt(MSE2)
54 NRMSE2= RMSE2/statistics.mean(Bhsign2)
55
56 MSE3 = mean_squared_error(Bhsign3, Mhsign3)
57 RMSE3= math.sqrt(MSE3)
```

```

58 NRMSE3= RMSE3/statistics.mean(Bhsign3)
59
60 MSE4 = mean_squared_error(Bhsign4, Mhsign4)
61 RMSE4= math.sqrt(MSE4)
62 NRMSE4= RMSE4/statistics.mean(Bhsign4)
63 #Plot
64 NMRSE=[NRMSE0, NRMSE1, NRMSE2, NRMSE3, NRMSE4,]
65 NMRSEstr=["0 a 1", "1 a 2", "2 a 3", "3 a 4", ">4"]
66 bars= plt.bar(NMRSEstr, NMRSE)
67 plt.title('NRMSE da altura signicatica da ondulação na Nazaré')
68 plt.xlabel('Altura Significativa (m)')
69 plt.ylabel('Normalized Root Mean Square Error')
70 for bar in bars:
71     yval= bar.get_height()
72     plt.text(bar.get_x(),yval + .005, float("{:.2f}".format(yval)))
73 plt.show()
74
75 #-----BIAS-----
76
77 Bhsign0= Bhsign0.reset_index(drop=True)
78 Mhsign0= Mhsign0.reset_index(drop=True)
79 Dif0 = (Mhsign0-Bhsign0)
80 BIAS0 = Dif0.sum()/len(Dif0)
81
82 Bhsign1= Bhsign1.reset_index(drop=True)
83 Mhsign1= Mhsign1.reset_index(drop=True)
84 Dif1 = (Mhsign1-Bhsign1)
85 BIAS1 = Dif1.sum()/len(Dif1)
86
87 Bhsign2= Bhsign2.reset_index(drop=True)
88 Mhsign2= Mhsign2.reset_index(drop=True)
89 Dif2 = (Mhsign2-Bhsign2)
90 BIAS2 = Dif2.sum()/len(Dif2)
91
92 Bhsign3= Bhsign3.reset_index(drop=True)
93 Mhsign3= Mhsign3.reset_index(drop=True)
94 Dif3 = (Mhsign3-Bhsign3)
95 BIAS3 = Dif3.sum()/len(Dif3)
96
97 Bhsign4= Bhsign4.reset_index(drop=True)
98 Mhsign4= Mhsign4.reset_index(drop=True)
99 Dif4 = (Mhsign4-Bhsign4)
100 BIAS4 = Dif4.sum()/len(Dif4)
101
102 Difmedia4 = (Mhsign4-Bhsign4)
103 NBIAS4 = Difmedia4.sum()/Bhsign4.sum()
104
105 #PLOT
106 NMRSE=[BIAS0, BIAS1, BIAS2, BIAS3, BIAS4]
107 NMRSEstr=["0 a 1", "1 a 2", "2 a 3", "3 a 4", ">4"]
108 bars= plt.bar(NMRSEstr, NMRSE)
109 plt.style.use('seaborn')
110 plt.title('BIAS da altura signicatica da ondulação na Nazaré')
111 plt.ylabel('BIAS')
112 plt.xlabel('Altura Significativa (m)')
113
114 for bar in bars:
115     yval= bar.get_height()
116     plt.text(bar.get_x(),yval + .005, float("{:.2f}".format(yval)))
117 plt.show()

```