

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA E ENERGIA



**Ondas Gigantes na Nazaré: estudo sobre as condições ideais
de ocorrência**

Diogo André Reis de Sousa

Mestrado em Ciências Geofísicas
Especialização em Oceanografia

Dissertação orientada por:
Professor Doutor Joaquim Guilherme Henriques Dias
Doutor José Paulo dos Santos Ferreira Pinto

Dedicado à minha família



Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meu pais e ao meu irmão. Foram eles que desenharam a pessoa que sou hoje, foram eles que permitiram chegar onde cheguei, foram eles que aguentaram as minhas frustrações e mudanças de humor, e são eles que alimentam as minhas ambições. Ao mesmo tempo que agradeço, peço também desculpa se em algum destes meses estive fora de mim ou se os magoei.

Quero agradecer a todos os meus amigos, e todas as pessoas que passaram na minha vida nestes 5 anos, pelo caminho que me ajudaram e fizeram traçar, por todos os bons momentos, por tudo o que partilhámos e passámos juntos, vocês foram quem segurou a minha sanidade mental, e permitiu finalizar este trabalho.

Às pessoas que fizeram parte da orientação deste trabalho, professor Joaquim Dias e Dr. José Paulo Pinto, pela oportunidade e confiança concedidas, para desenvolver um trabalho numa área muito pouco explorada, e por acreditarem nas minhas capacidades.

Ao professor Rui Taborda e Dra. Ana Silva pela enorme disponibilidade, vontade e entusiasmo em cooperar, fornecendo dados, ensinando a trabalhar com modelos que desconhecia e em tirar dúvidas.

Ao professor Leonel Gordo e Dra. Ana Neves, por mesmo sendo de uma área distinta, se mostraram extremamente disponíveis, para tentar explorar e atacar o assunto.

À Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, e TODAS as pessoas que a integram, esta foi a minha casa durante 5 anos.

Resumo

O carácter especial da onda da Nazaré, fomenta muito curiosidade, tanto a nível científico como a nível social. Este cariz único, deve-se ao mecanismo de formação da onda, ligado principalmente a quatro fatores: diferença de profundidade entre a plataforma continental e o canhão da Nazaré, efeito de empolamento da onda devido à diminuição de profundidade, interferência positiva entre a onda proveniente do canhão e a que se propaga pela plataforma continental, e orientação do canhão. Apesar dos fatores referidos, as ondas gigantes só ocorrem, quando se abrangem um certo tipo de condições para alguns parâmetros. A altura significativa, período médio, período de pico e direção média são os principais parâmetros que definem os dias como sendo, um dia comum, ou, um dia de ondas gigantes. Os dados usados neste trabalho, disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico (IH), provêm do sistema integrado de observação de ondas (MONICAN), constituído por duas boias ondógrafo (MONICAN01 e MONICAN02), a primeira colocada a 50km da linha de costa, numa zona onde a profundidade é 2000m, e a segunda 10km da praia da Nazaré, onde a profundidade é de 90m. Os dados analisados nesta dissertação, são de observações horárias, feitas desde Janeiro de 2012 até Dezembro de 2017. Através do modelo numérico SWAN, foi possível ver através de espetros direcionais, a existência das duas frentes de onda que caracterizam este fenómeno, e ainda quando estas se começam a formar e quais as suas características espectrais. O SWAN permitiu também, analisar a propagação espacial do sistema de ondas que entra nesta região da costa, e a influência da batimetria nos parâmetros espectrais.

Através de uma base de dados, que contém os dias de evento (ocorrência de ondas gigantes), dentro do período das observações, construída a partir de informações da comunicação social, fotografias e redes sociais, analisou-se o comportamento dos diferentes parâmetros espectrais, e chegou-se a uma condição que define em que intervalo de valores, cada parâmetro espectral deve estar inserido, para que esse dia seja considerado como dia de evento. Para a altura significativa, período médio e período de pico, a condição é definida como, a diferença entre a média de 24h e a variação de um desvio padrão em relação à média ($\bar{x} - (\mu - \sigma)$). Para a altura significativa, esta diferença deve ser superior a 0.29, para o período médio superior a -2.12, e para o período de pico superior a -1.52. A direção média define como intervalo ideal, direções entre 300° e 340°. A variação do período de pico, é também considerado como o principal sinal, para identificar um evento de ondas grandes, mas devido à sua grande oscilação, e dependência em relação ao valor atual deste parâmetro, não permite a definição de um intervalo ideal. Devido ao baixo número de eventos (38) na base de dados, será de esperar que caso sejam inseridos, mais eventos, como por exemplo os ocorridos neste ano de 2018, seja o suficiente para alterar os intervalos considerados como os ideais.

Apesar da possível importância de um trabalho deste tipo, para comunidade surfista e mesmo para entidades municipais, a escassez de informação, tanto a nível do número de dados, como a nível de tipo de dados, não permitiu uma conclusão tão forte.

Palavras-chave: Nazaré, ondas de superfície, ondas gigantes, boias ondógrafo, MONICAN, SWAN

Abstract

Nazaré is a very special place, it's a place of discovery and it involves really important matters for the scientific and social community. This special character is related with the wave formation mechanism that works due to four factors: difference in depth between the continental shelf and Nazaré's canyon, shoaling effect due to decreasing of depth, positive interference between the wave prevenient from the canyon and one that comes from the continental shelf, and the canyon orientation. Behind these factors the giant waves only occurs when in this region the wave parameters are under certain conditions. Significant wave height, average period, peak period and average direction are the main parameters that describe if we are under a normal day or a giant waves day. The data used in this thesis was made available by Instituto Hidrográfico (IH), and it comes from the observation wave system MONICAN, constituted by two oceanographic buoys (MONICAN01 e MONICAN02), the first one located at 50km from the shore, where the depth is 2000m and the second one at 10km from the Nazaré's Beach where the depth is 90m. The analised data has a time sampling of one hour and it goes from January 2012 to December 2017. Using SWAN numerical model, its possible to see from it's directional spectrum, the existence of the two wave fronts that defines Nazaré's wave and its spectral characteristics. SWAN allowed to analyse the spatial propagation of the wave system that enters this shore and the control of the bathymetry on the spectral parameters.

Using photos dates, social media information and social networks a database database was built for the days when giant waves occured. For this database the behavior of each spectral parameters was analysed in a way that it was possible to define a range of values and conditions for each parameter. For significant wave height, average period and peak period the main condition is defined by the difference between the average for 24h and the variation of one standard deviation from the mean ($\bar{x} - (\mu - \sigma)$). For significant wave height this mathematical condition must be higher thant 0.29, for average period higher than -2.12 and for peak period superior to -1.52. The average direction is defined as an ideal range of values, between 300° and 330°. The peak period variation (hourly) is also considered as the main signal to identify a big wave event but, its high oscillation and dependence on its value when it's being analysed, it doesn't allow to define an ideal condition or range of values. The number of big wave days (38) it's expected to be low to define these conditions, the entrance of just some new days in the database will be enough to change these values.

Despite the possible importance of this thesis for the big wave surf community and for municipal entities, the scarcity of information like low number of data and kind of data, doesnt allow to define stronger conditions.

Keywords: Nazaré, surface waves, giant waves, oceanographic buoys, MONICAN, SWAN

Conteúdo

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Figuras	xv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Visão Geral	3
1.3 Objectivos	3
1.4 Estrutura da Tese	4
2 Fundamentos Teóricos e Operacionais	5
2.1 O Canhão e a Onda da Nazaré	5
2.2 As Boias Ondógrafo (MONICAN)	6
2.3 Teoria Linear das Ondas	8
2.3.1 Aproximação para Águas Profundas e Águas Pouco profundas	9
2.3.2 Efeitos na aproximação à costa	12
2.4 Parâmetros Espectrais	17
2.4.1 Altura Significativa	18
2.4.2 Período Médio e Período de Pico	18
2.4.3 Direção Média, Direção Média no Período de Pico e Dispersão no Período de Pico	19
2.5 Modelo SWAN	19
2.5.1 Objetivo de aplicar o SWAN	20
2.6 Estatística e Teste de Hipóteses	21
3 Metodologia e Tratamento de Dados	23
3.1 Análise aos Parâmetros Espectrais	23
3.1.1 Altura Significativa	27
3.1.2 Direção, Dispersão e Período	28
3.2 SWAN (Simulações)	28

4 Resultados	31
4.1 SWAN	31
4.2 Parâmetros Espectrais	34
4.3 Validação dos Valores dos Parâmetros Espectrais	40
5 Conclusões	47
5.1 Resultados Conseguídos	49
5.2 Trabalho futuro	49
Bibliografia	51
A Teoria Linear para Ondas de Superfície Gravíticas	53
B Função para descarregar os dados mensais das boias	57
C	63

Lista de Tabelas

2.1	Características e Localização das Boias.	7
2.2	Erros associados aos resultados dos testes de hipóteses.	22
3.1	Parâmetros contidos nos ficheiros.	23
3.2	Datas em que foi noticiada a ocorrência de ondas gigantes.	24
3.3	Registos MONICAN01.	25
3.4	Registos MONICAN02.	25
3.5	Simulações feitas nos SWAN.	30
4.1	Datas dos eventos filtradas para a série de dados.	34
4.2	Registos nos dias de evento.	39
4.3	Parâmetros ordenados por ordem de relevância com respetivas condições.	45

Lista de Figuras

1.1	Onda gigante na Nazaré, foto: Rafael Riancho.	2
2.1	Batimetria ao largo da Nazaré.	5
2.2	Localização das boias MONICAN.	7
2.3	Trajectoria das partículas devido à deslocação de uma onda	8
2.4	Representação gráfica da propagação de uma onda harmónica.	10
2.5	Interação entre duas ondas harmónicas.	11
2.6	Varição dos parâmetros de onda na aproximação à costa	14
2.7	Princípios de Refração numa onda.	14
2.8	Propagação da onda e o efeito da corrente.	16
2.9	Definição de onda.	17
2.10	Batimetria introduzida no modelo modelo (batimetria fornecida pelo Instituto Hidrográfico).	20
2.11	Interferência de ondas.	21
3.1	Série Temporal para Altura Significativa, com os eventos assinalados a vermelho (considerando um dia inteiro) para MONICAN01 e MONICAN02.	24
3.2	Variáveis Altura Significativa, Período de Pico e Período médio para o dia antes e dia do evento, a janela a preto indica que as condições não são favoráveis à ocorrência de ondas gigantes e a verde um registo correspondente à ocorrência de ondas gigantes.	26
3.3	Diferença entre os registos de altura significativa medidos na boia ($\approx 5\text{m}$) e altura da onda a rebentar junto à costa ($\approx 20\text{m}$).	28
3.4	Domínio Inicial (cima) e Dominio Local (baixo) usados nas simulações SWAN (Resultados obtidos através de ficheiros de teste.	29
4.1	Outputs (Altura Significativa (a), Direção Média (b), Dispersão (c), Período de Pico (d)) obtidos a através do SWAN para uma batimetria fornecida pelo Instituto Hidrográfico (IH) (e), para o domínio local numa janela ainda mais próxima da costa.	32
4.2	Espetros Direccionais calculados em diferentes pontos com recurso ao SWAN, com os valores de entrada correspondentes ao teste 3 da tabela 2.2	33
4.3	Onda gerada pela interferência de duas frentes de onda ("Wedge") na Nazaré.	33
4.4	Histograma para os vários parâmetros estatísticos para os dias considerados como "normais".	35

4.5	Histograma para os vários parâmetros estatísticos para os dias considerados como de “ondas grandes”	36
4.6	Valores de altura significativa para cada intervalo de direção média.	36
4.7	Comparação entre os valores dos parâmetros no dia anterior ao evento e no dia do evento.	37
4.8	Comparação entre os valores dos parâmetros no dia anterior ao evento e no dia do evento aplicando a condição 1 (Remoção dos dias consecutivos na matriz A).	38
4.9	Comparação entre os valores dos parâmetros no dia anterior ao evento e no dia do evento aplicando a condição 1, 2, 3 e 4.	39
4.10	Teste de Hipóteses (Hipótese alternativa: $H_0 = \mu$) para altura significativa, período de pico período médio para diferentes níveis de significância	41
4.11	Soma dos resultados dos testes de Hipóteses para Hipótese alternativa: $H_0 = \mu$ e Hipótese alternativa: $H_0 > \mu$ para altura significativa, período de pico e período médio para diferentes níveis de significância	42
4.12	Análise aos dias de eventos catalogados capturados no teste de hipótese e à sua relação entre parâmetros para diferentes níveis de significância (α_1 a), α_2 b), α_3 c), α_4 d))	43
4.13	Número de eventos considerados pelos testes de hipóteses ($\alpha = 0.01$) para cada mês de 2012 a 2017 para, altura significativa a), período médio b) e período de pico c)	44
4.14	Altura Significativa, Período de Pico e Período Médio representadas como normais para dia de evento (azul) e de não evento (vermelho).	46
A.1	Formulação Equação de Balanço de uma propriedade μ	53
A.2	Explicitação gráfica das equações resolvidas na forma de função de velocidade potencial.	56
C.1	Variações dos parâmetros estatísticos para o dia antes ao evento e para o dia dia do evento.	66

Capítulo 1

Introdução

A Nazaré desde 2010 que deixou de ser apenas um sítio temido pela sua forte e perigosa agitação marítima, mas passou a ser um sítio icónico no mundo onde todos querem observar e usufruir das ondas gigantes proporcionadas por um conjunto de condições únicas. As circunstâncias que permitem o acontecimento deste fenómeno estão ligadas ao Canhão da Nazaré, à sua disposição, orientação e ainda à sua incrível proximidade à linha de costa.

A presença do canhão faz com que a onda na aproximação à costa se divida em duas frentes de onda, uma delas propagando-se com uma velocidade elevada ao longo do eixo do canhão, e a outra, afetada pela orografia das margens laterais do canhão, se propague com uma velocidade inferior devido à menor profundidade e consequente influência do fundo. A geração da famosa onda da Nazaré (figura 1.1) deve-se então à interferência destas duas frentes de onda e, é este fator, juntamente com outros como a direção e intensidade do vento, e a direção da ondulação ao largo, que tornam a previsão da ocorrência deste acontecimento algo bastante complexo. No entanto é reconhecido que certas condições de agitação marítima ao largo, ondulação regular com incidência no setor WNW (Cunha and Gouveia, 2015) e altura significativa elevada propiciam a ocorrência sistemática de ondas gigantes com características ótimas para a prática de *tow-in surfing* e para os mais experientes *paddling surfing*. Um conhecimento quantitativo e qualitativo destas condições permitirá efetuar previsões com um maior grau de fiabilidade e exatidão para a probabilidade de ocorrência de ondas gigantes na Praia do Norte.

A agitação marítima, sendo essencialmente um fenómeno estocástico gaussiano, é representada pelo espectro de variância da elevação da superfície livre a partir do qual se determinam todas as suas características estatísticas. As previsões operacionais de agitação marítima são realizadas através de modelos espectrais oceânicos que disponibilizam diversos parâmetros, nomeadamente a altura significativa, a direção média e de pico, período médio e de pico, dispersão, frequência e direção, que no seu conjunto permitem uma descrição quase completa do regime de ondas. Esta descrição nunca fica completa, caso não existam informações sobre a ondulação gerada em Oceano Aberto (*swell*). Por outro lado, estações ondógrafo como é o caso do que vai ser analisado neste trabalho, adquirem em tempo real e de forma rotineira os valores destes parâmetros espectrais permitindo não só validar os



Figura 1.1: Onda gigante na Nazaré, foto: Rafael Riancho

modelos físicos, mas sobretudo construir um registo histórico de importância vital para a análise no tempo de fenómenos influenciados pelas condições de agitação marítima.

Os dados usados neste trabalho foram disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico que, como instituição de acolhimento no âmbito deste trabalho de tese, comprometeu-se a disponibilizar os registos dos parâmetros espectrais adquiridos pelas boias MONICAN fundeadas ao largo da Nazaré. Foi ainda disponibilizada uma batimetria de alta resolução com a cobertura necessária para a implementação do modelo numérico SWAN.

1.1 Motivação

A descoberta, impulsão e transformação da Nazaré de uma antiga vila piscatória localizada na região Oeste de Portugal, para um dos "spots" mais conhecidos no que toca ao surf de ondas gigantes, deveu-se principalmente ao impulso dado pelo surfista Garret Macnamara, tanto a nível desportivo como social e económico. Este assunto sempre teve algo de deslumbrante, primeiramente pelo facto de termos um fenómeno tão especial a ocorrer na nossa costa e de possível observação, pela coragem das pessoas que enfrentam a natureza deste modo, e ainda pela enorme proporção e assustadora beleza que estes fenómenos tomam. A incerteza na data e dimensão de um acontecimento destes eventos, foi principal motivação para o trabalho, para além de uma vontade de explorar o assunto de uma forma mais detalhada e científica.

Outra das grandes motivações surgiu também dos trabalhos feitos por Caldwell and Aucan (2007) e Caldwell et al. (2009) que primeiramente me lançaram a ideia de tentar estimar uma fórmula empírica

que com recurso a parâmetros das boias pudesse devolver a altura da onda na rebentação, o que serviria em grande parte como um trabalho virado para a comunidade ligada ao surf de ondas gigantes. Esta ideia no entanto, veio a tornar-se de muito difícil realização por vários motivos, não só pelas características do fundo, mas também pelas condições que levam à geração de ondas gigantes na Nazaré e que tornam este local tão único. A validação desta fórmula tornaria este trabalho ainda mais complexo, como tal decidiu-se começar por uma abordagem mais central da questão e deixar este tema para um trabalho futuro.

O último ponto motivacional foi sem dúvida querer saber aplicar todas as ferramentas e conhecimentos que nestes 5 anos (2013-2018), me permitem olhar, estudar, analisar, simular e atacar estes assuntos de forma diferente e desenvolver uma maneira de certa forma resolver o problema, isto claro, com a ajuda das pessoas ideais que se juntaram a este projeto, também eles foram claro uma grande motivação.

1.2 Visão Geral

Este tema, devido às suas características tão únicas e tão difíceis de reproduzir, não apresenta ainda muitos estudos para além de pequenas explicações ao público, como por exemplo Cunha and Gouveia (2015), sobre o que se passa neste sítio de Portugal durante uma determinada altura do ano, para determinadas condições do mar. A comunidade científica ainda não fez um estudo muito intensivo de modo a tentar prever com mais facilidade este tipo de eventos, a maioria dos estudos desta área remetem para as áreas da sedimentologia, video-monitorização e engenharia geológica como descrevem os trabalhos Taborda and Silva (2012), Silva et al. (2012), Santos-Ferreira et al. (2015), Silva (2007) e Bosnic et al. (2014).

Este trabalho tornou-se então ,por vezes, muito difícil por não haver uma base que servisse de guia e/ou validação do que estaria a ser feito, mas isso também tornou o desafio mais trabalhoso e interessante, ainda que muitas vezes as dúvidas perdurassem mas que a suas soluções valessem todo o esforço.

1.3 Objectivos

Neste trabalho pretende-se identificar quantitativamente as condições de agitação marítima ao largo que proporcionam a ocorrência de ondas gigantes na Praia do Norte, Nazaré Esta relação de causalidade, cuja existência é a hipótese base deste trabalho, será estabelecida comparando os registos (data/hora) de ocorrências de ondas gigantes com os correspondentes valores dos parâmetros espectrais observados ao largo, recorrendo aos registos adquiridos pelas boias multi-paramétricas pertencentes à rede de monitorização do observatório MONICAN e disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico para o efeito. Foram considerados, nesta comparação, diversos parâmetros espectrais de modo a testar a combinação que melhor serve a propósito deste estudo.

O modelo numérico SWAN, será usado nesta dissertação como uma ferramenta para explicar fisicamente, como o fenómeno decorre em termos espaciais, nomeadamente como a batimetria o impulsiona

e como os valores medidos pela boia se justificam como valores para a ocorrência de ondas gigantes. O SWAN tem como principal output, o espectro direcional que permitirá validar, ou não, os conceitos teóricos que assentam sobre a separação da frente de onda inicial em duas frentes de onda.

O resultado final será constituído por estimadores estatísticos (valores médios e desvios padrões) de um conjunto de parâmetros espectrais que configuram o padrão de agitação marítima ao largo suscetível de produzir ondas gigantes. Com base nos valores encontrados para estes estimadores, pretende-se entender como se comportam os parâmetros em dias de evento e de que maneiras estes podem ser úteis para a previsão operacional, podendo assim contribuir para o desenvolvimento desportivo, económico e social das atividades relacionadas com o *surf* de ondas gigantes na Nazaré.

1.4 Estrutura da Tese

No capítulo 2 é feita descrição do local, das suas características topográficas e dos fenómenos físicos que levam à geração de ondas gigantes. É também detalhada a informação sobre as boias ondógrafo, a nível de funcionamento e posicionamento sobre o canhão. A teoria que permite a descrição dos fatores que influenciam este fenómeno é explícita também neste capítulo, juntamente com a descrição física e do cálculo dos parâmetros estatísticos usados neste trabalho. O modelo SWAN e o seu propósito são também explorados. Para além destes conceitos teóricos é feita também uma muito pequena abordagem à teoria estatística que vai ser usada neste trabalho.

O capítulo 3 mostra o tipo de dados trabalhados, a metodologia usada no seu tratamento, a justificação do caminho levado neste trabalho e as lacunas e falhas nos dados.

Os capítulos 4 e 5 desta dissertação, levam-nos ao núcleo deste trabalho, onde se mostram os resultados do modelo numérico e da análise estatística aos parâmetros e as respetivas conclusões. Mostra o que correu bem e o que poderia ter corrido melhor e o que poderá ser melhorado, aprofundado e realizado no futuro.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos e Operacionais

2.1 O Canhão e a Onda da Nazaré

O Canhão da Nazaré, é o canhão submarino mais comprido da margem oeste Ibérica, e inclusive da Europa, extendendo-se por mais de 200km, com profundidades que atingem 50 m junto à costa portuguesa, e de 5000m junto à conexão com a plataforma abissal Ibérica (figura 2.1).

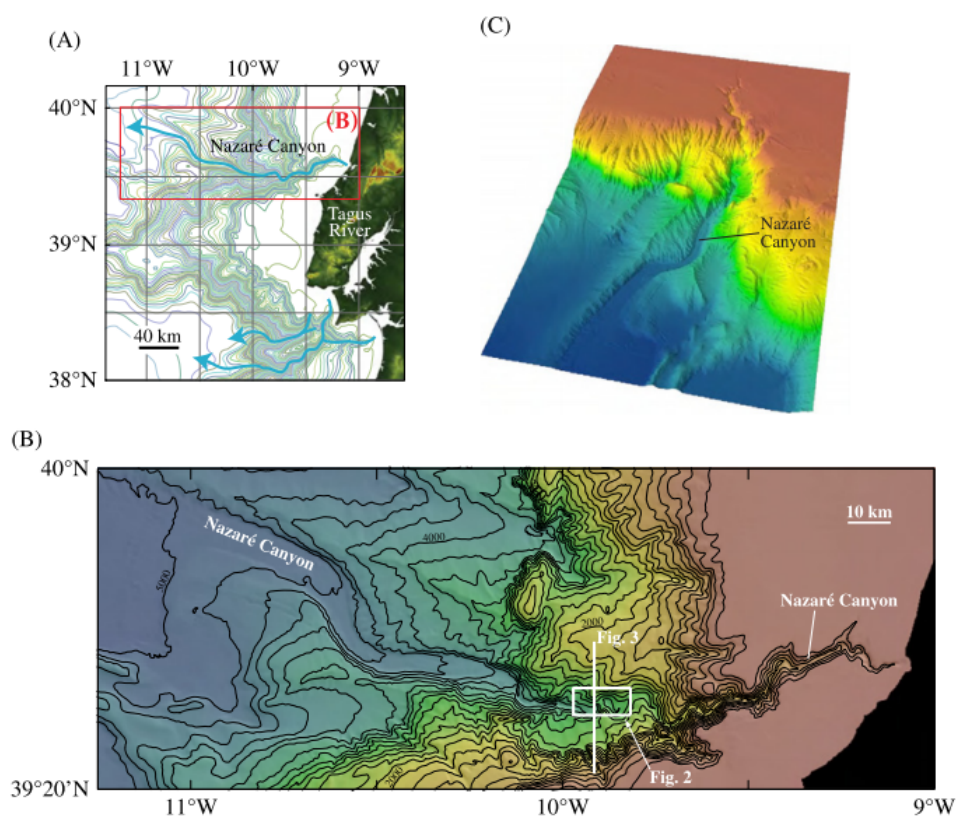


Figura 2.1: Batimetria do Canhão da Nazaré (Masson et al., 2011)

Como já foi explicado no capítulo 1, a proximidade do canhão em relação à costa, é o fator que permite a ocorrência de ondas gigantes na Praia do Norte. A chegada do forte *swell*, do quadrante oeste/noroeste proveniente do Atlântico Norte, à Praia do Norte, em conjunto com as características topográficas da zona, levam à geração de ondas gigantes principalmente devido a quatro fatores (Cunha and Gouveia, 2015):

1. Refração da onda, devido à diferença de profundidade entre a plataforma continental e o canhão, levando uma mudança de direção na zona do canhão onde a onda viaja mais rapidamente (maior profundidade).
2. Efeito de empolamento da onda devido à diminuição da profundidade (*shoaling*), que ocorre aquando do galgamento da barreira topográfica (variação rápida do declive) fazendo com as ondas passem a ter um comprimento de onda mais curto e uma maior amplitude. Este efeito ocorre gradualmente durante a aproximação à costa.
3. A interferência positiva entre a onda que provém do canhão e a que se propaga através da face norte da Plataforma Continental, isto resulta num empolamento da altura da onda no ponto de interseção entre as duas frentes de onda. Este ponto é um dos mais importantes e difíceis de analisar.
4. A orientação deste canhão e o modo como ele intersecta a linha de costa permitem que este modifique as correntes que a própria ondulação cria junto à costa, fazendo com que em certos períodos se desenvolva uma corrente forte que se opõe às ondas, e sirva como mais um fator de amplificação.

As condições extremas de agitação marítima, propícias à ocorrência de ondas gigantes ao largo da costa da Nazaré, sucedem geralmente nos períodos coincidentes com as tempestades de Inverno (Set-Fev). Estes eventos extremos, são geralmente caracterizados por valores elevados de altura significativa (entre os 4m e os 9m), e períodos de pico a atingir por vezes os 20s. No entanto, um mar “limpo, grande e surfável”, não requer apenas condições oceânicas extremas, uma vez que esses períodos de tempestade, estão muitas vezes associados a ventos fortes, e a uma importante geração de vaga local, fazendo com que fiquemos na presença de dois sistemas. O primeiro gerado no Atlântico Norte, bem pronunciado e descrito por períodos longos e um comprimento de onda grande, e ainda uma direção bem caracterizada, e outro gerado costeiramente, devido ao vento forte que se faz sentir, caracterizado por períodos curtos e uma direção de onda variável.

2.2 As Boias Ondógrafo (MONICAN)

O sistema integrado de observação de ondas (Sistema MONICAN), é constituído por duas boias ondógrafo direcionais (MONICAN01 e MONICAN02), que permitem a medição de hora a hora de parâmetros meteorológicos, de agitação marítima e ambientais. Contemplam ainda, um conjunto de termistores para

registo de temperatura, a diferente níveis de profundidade, e ambas as boias dispõem ainda de um perfilador acústico de correntes, instalado a 7m de profundidade que permite ter os dados das correntes nos primeiros 100m de profundidade (Martins et al., 2010). Este tipo de boias, recolhe automaticamente os dados, processa-os, armazena-os em disco e transmite-os via rádio ou satélite. Certos parâmetros, são transmitidos horariamente para estação em terra via satélite (Martins et al., 2010), enquanto que os dados brutos, são arquivados internamente na boia e são alvo de processamento posterior, estando posteriormente disponíveis, para serem trabalhados pela Instituição (IH), ou fornecidos para alvo de investigação, como é o caso deste trabalho.

Este sistema é completado em terra, onde dispõe de um sistema de telemetria e de um computador, onde faz a receção dos dados. É ainda complementado, com outras 3 estações da Rede Nacional, da responsabilidade do Instituto Hidrográfico, os marégrafos de Peniche e da Nazaré e a estação meteorológica instalada em Ferrel.

A boia MONICAN02 (figura 2.2), foi implementada em Março de 2010, e encontra-se no enfiamento do canhão a cerca de 10km da praia da Nazaré (Martins et al., 2010), enquanto que a MONICAN01 (implementada em Abril de 2009), encontra-se a cerca de 50km da linha de costa, estando num zona onde a profundidade do canhão é de 2000m (Belo-Pereira et al., 2014) (Tabela 2.1).

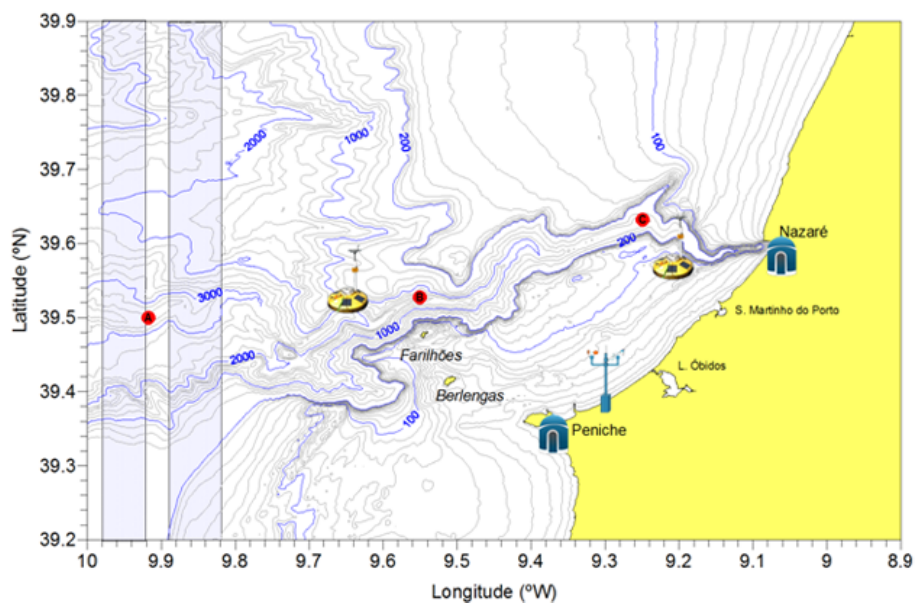


Figura 2.2: Localização das Boias ondógrafo MONICAN01 (39.52°N, 9.64°W) e MONICAN02 (39.56°N, 9.21°W) (<http://monican.hidrografico.pt/>)

Boia	Latitude	Longitude	Profundidade	Frequência
MONICAN01	39.515278 N	9.637222 W	2000 m	1/1h
MONICAN02	39.560278 N	9.210833 W	90 m	1/1h

Tabela 2.1: Características e Localização das Boias Ondógrafo.

As boias (MONICAN01 E MONICAN02), que permitem fazer a descrição da agitação marítima ao largo da costa da Nazaré, pertencem ao Observatório do Canhão da Nazaré, que foi implementado entre

2008 e 2011, com o apoio do Mecanismo Financeiro EEA Grants 2004-2009 (projeto MONICAN). Presentemente, este observatório integra a rede de observatórios costeiros europeus, reunida no quadro do projecto Europeu JERICO-NEXT (H2020-INFRAIA 2014-2015).

As bóias estão equipadas com os seguintes sensores:

- Wavesense 3 (Fugro Oceanor, integra sensor de ondulação e registador)
- Velocidade e direção do vento (Young)
- Pressão atmosférica (Vaisala)
- Temperatura do ar (Vaisala)
- Humidade relativa (Vaisala)
- Hidrocarbonetos (Nereides Oil Spy)
- Oxigénio (Royce)
- Clorofila-a (Chelsea MiniTracka II)

Na amarração estão integrados outros sensores:

- Temperatura (Sea Bird, SBE 39-IM)
- Perfilador de corrente (RDI WorkHorse Sentinel, 300 KHz)

2.3 Teoria Linear das Ondas

Para entender fisicamente, os processos que levam à geração de ondas gigantes, é necessário entrar na Teoria Linear das Ondas, isto porque as condições topográficas únicas da costa da Nazaré, permitem-nos falar em 'condições de água profunda' junto à costa. É preciso saber que condições são estas, em que influenciam as ondas e quais os parâmetros físicos que as definem.

Para descrever as ondas, no contexto da teoria linear, é necessário recorrer à soma de um grande número de ondas harmónicas independentes (Holthuijsen, 2017), perceber estas ondas é no fundo fisicamente entender as ondas harmónicas. Isto é possível, graças à teoria linear para ondas de superfície gravíticas (a única força externa considerada é a gravidade), que descreve em detalhe as ondas harmónicas. Uma onda mecânica, é gerada pela propagação de uma perturbação, neste caso provocada pelo vento, e da sua propagação de energia pelo espaço, este conceito geral aplica-se a todo o tipo de ondas (sonoras, eletromagnéticas,

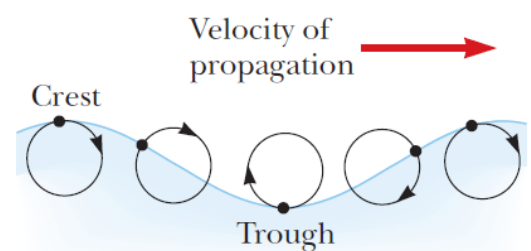


Figura 2.3: Trajetória das partículas devido à deslocação de uma onda (Serway and Jewett, 2014)

etc). Na teoria, as ondas de superfície geradas pelo vento, sofrem uma perturbação que provoca um deslocamento transversal e longitudinal (Serway and Jewett, 2014), enquanto uma onda viaja as partículas na superfície descrevem trajetórias circulares (figura 2.3), na realidade as trajetórias são aproximadamente circulares com um comportamento mais achatado consoante a distância para o fundo .

As ondas de superfície, apresentam várias particularidades, a ter em conta quando se descreve uma teoria que as linearize. Estas propagam-se num fluido, e podem sofrer interações de vários tipos, como tal, a física do problema tem de ser resolvida de maneira diferente para águas profundas, e para águas pouco profundas. O único princípio comum, que inteira ambas as abordagens, é considerar a oceano como um fluido ideal (incompressível, irrotacional e não viscoso), sendo a gravidade a única força que controla os movimentos das partículas (Holthuijsen, 2017).

2.3.1 Aproximação para Águas Profundas e Águas Pouco profundas

A Teoria Linear das ondas, baseia-se em equações de balanço guiadas por várias condições, e em condições fronteira para definir os domínios que as equações se inserem. Para além de considerar o oceano como um fluido incompressível, é também preciso considerar que as ondas se propagam independentemente, e não interagem entre si. Os fundamentos físicos e matemáticos desta teoria, são desenvolvidos a partir da resolução da equação de Laplace e Bernoulli (Apêndice A).

Começando pela solução analítica para a equação de Laplace (eq. A.8), com a condição cinemática à superfície ($z = \eta$), caracterizada por uma onda harmónica que se propaga no eixo positivo do x (Holthuijsen, 2017):

$$\eta(x, t) = a \sin(\omega t - kx) \quad (2.1)$$

Se a solução da equação de Laplace, for expressa em termos da função potencial de velocidade obtêm-se:

$$\phi = \hat{\phi} \cos(\omega t - kx) \quad \text{em que} \quad \hat{\phi} = \frac{\omega a \cosh[k(d+z)]}{k \sinh(kd)} \quad (2.2)$$

Em que ω , é a frequência angular $\omega = 2\pi/T$, k é o número de onda $k = 2\pi/L$ e d é a profundidade, a amplitude a , é representada por metade da altura da onda $H/2$ (figura 2.4).

Um dos pontos principais da teoria linear de ondas, é também a aproximação de pequena amplitude, isto é, a amplitude da onda deve ser pequena, quando comparada com o comprimento de onda e com a profundidade ($ak \ll 2\pi$ e $a \ll d$) (Holthuijsen, 2017).

Sabendo resolver a função potencial analiticamente, e conseguindo trabalhar na forma de onda harmónica, que foi o desejado inicialmente para a construção desta teoria, é possível resolver analiticamente, a velocidade das partículas de água, e a variação nas propriedades da onda.

Para considerar a onda harmónica como livre de interações, é necessário considerar a condição fronteira à superfície em $p = \text{cte} = 0$, substituindo as equações 2.1 e 2.2 na expressão que garante esta

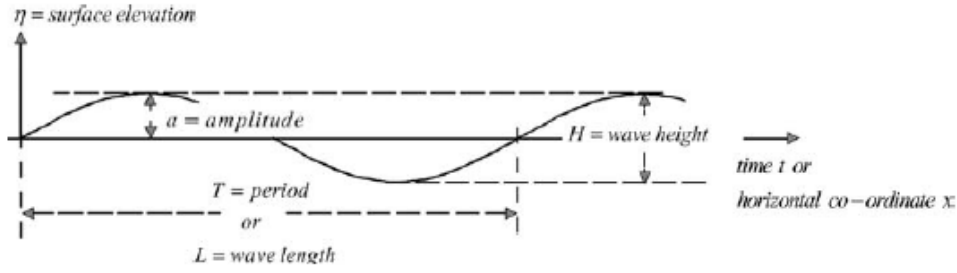


Figura 2.4: Representação gráfica da propagação de uma onda harmônica (Holthuijsen, 2017)

condição, (eq: A.14) obtém-se a relação de dispersão das ondas gravíticas de superfície (Holthuijsen, 2017):

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2.3)$$

A relação de dispersão, pode ser aproximada para águas profundas considerando $(\tanh(kd) \rightarrow 1$ para $kd \rightarrow \infty)$, ficando definida por:

$$\omega = \sqrt{gk_0} \quad \text{ou} \quad L_0 = gT^2 / (2\pi) \quad (2.4)$$

onde k_0 e L_0 , são o número de onda e comprimento de onda para água profunda. A relação de dispersão, é uma expressão implícita em termos de número de onda (k), o que requer um processo iterativo, para uma dada frequência e profundidade, para calcular o número de onda. Esta expressão, permite-nos também chegar à velocidade de propagação da fase da onda, velocidade esta que é caracterizada por $c = L/T = \omega/k$, sendo a expressão final dada por:

$$c = \frac{g}{\omega} \tanh(kd) = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)} \quad (2.5)$$

A expressão conclui algo importante para este trabalho, a velocidade de fase depende do número de onda e por consequência da frequência, o que mostra que a forma das ondas mais compridas, viaja mais rapidamente do que a forma das ondas mais curtas. Este tipo de ondas, cuja velocidade de fase depende do comprimento de onda, são denominadas como ondas dispersivas. Podemos ainda aproximar a equação 2.5, para águas profundas $(\tanh(kd) \rightarrow 1$ para $kd \rightarrow \infty)$, para entender melhor o que foi concluído:

$$c_0 = \sqrt{\frac{g}{k_0}} \quad \text{ou} \quad c_0 = \frac{g}{\omega} \quad \text{ou} \quad c_0 = \frac{g}{2\pi} T \quad (2.6)$$

A equação 2.6, explica o comportamento das ondas em águas profundas, no fundo mostra que a sua propagação apenas depende da perturbação inicial, e que não existem outros fatores externos (exceto a gravidade), que influenciem os parâmetros que definem a onda. O mesmo não acontece com as ondas que se propagam em águas pouco profundas $(\tanh(kd) \rightarrow kd$ para $kd \rightarrow 0)$, obtém-se da equação 2.5:

$$c_{shallow} = \sqrt{gd} \quad (2.7)$$

Em água pouco profunda, a velocidade de fase, não depende do comprimento de onda ou da frequência, o que caracteriza estas ondas como não dispersivas.

Este capítulo, começou por explicar que as ondas do mar, podem ser caracterizadas fisicamente como a soma de ondas harmónicas. Se adicionarmos duas ondas harmónicas (η_1 e η_2), com características diferentes, nomeadamente a frequência, a viajarem em direcções iguais, estas ondas vão se 'reforçar', no momento em que a sua fase coincidir, mas vão se cancelar quando estiverem com um diferença de fase de 180° (fig. 2.5), isto é quando a crista de umas das ondas coincide com a cava da outra.

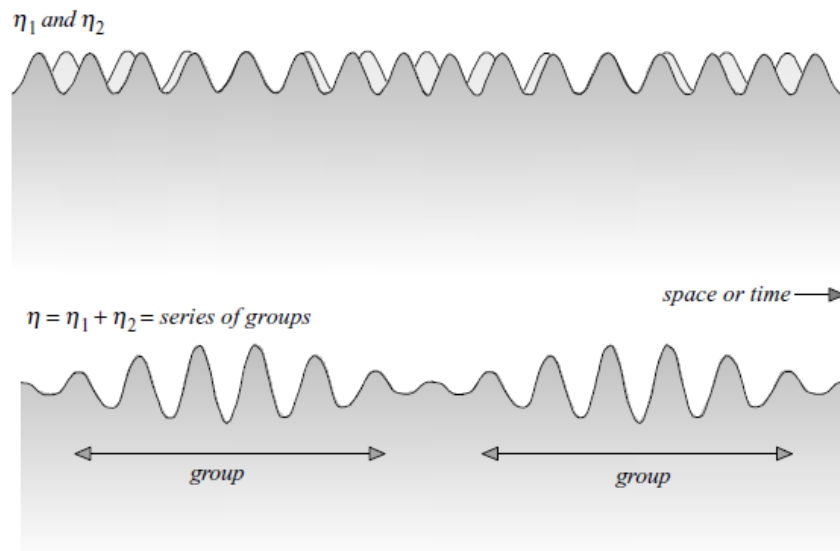


Figura 2.5: Interação entre duas ondas harmónicas (Holthuijsen, 2017)

Considerando duas ondas com igual amplitude, a interação linear entre as duas ondas resulta da sua sobreposição:

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 = a \sin(\omega_1 t - k_1 x) + a \sin(\omega_2 t - k_2 x) \quad (2.8)$$

η toma o valor máximo, quando ambas as ondas estão em fase. A velocidade de propagação neste ponto, é definida como velocidade de grupo, e pode ser determinada a partir da da relação da dispersão (Holthuijsen, 2017):

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = n c \quad (2.9)$$

onde c , é a velocidade de fase da onda, e n também provém da relação de dispersão:

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \quad (2.10)$$

Viu-se anteriormente, que $kd \rightarrow 0$ para águas pouco profundas, e que $kd \rightarrow \infty$ para águas profundas, isto permite concluir que $0 \leq 2kd/\sinh(2kd) \leq 1$, o que leva a entender que $n = 1/2$ para águas profundas, e $n = 1$ para águas pouco profundas. Isto implica, que a velocidade de fase de uma onda gravítica de superfície, seja sempre superior ou igual à velocidade de grupo: $c \geq c_g$ (Holthuijsen, 2017).

Uma das consequências desta conclusão, é que cada onda viaja independentemente através do grupo, até encontrar a frente onde desaparece, isto mostra que os grupos são na verdade alimentados, por ondas que são geradas na “cauda” do grupo.

Em água profunda $n = 1/2$, então a velocidade de grupo é metade da velocidade de fase $c_g = \frac{1}{2}c$. Em água pouco profunda, a velocidade de grupo é igual à velocidade de fase $c_g = c$, isto significa que nestas condições, onde cada uma mantém a sua posição no grupo, não há ondas a desaparecer na frente nem a serem geradas na cauda. É importante perceber, a dependência de velocidade de grupo em relação à frequência, o que faz com que as ondas dispersem lentamente, numa sequência com as ondas mais longas que viajam mais rapidamente, à frente das ondas mais curtas, dispersando a energia pelo oceano (Holthuijsen, 2017). Este fenómeno, é chamado como dispersão em frequência, e explica a formação de swell em oceano aberto (neste trabalho as condições ideais provém de um swell bem caracterizado formado no Atlântico Norte), que viaja pelo oceano, é este fenómeno que transforma vagas irregulares geradas pelo vento da tempestade em ondulação.

Através equação 2.7, verificou-se que o fundo vai ser um dos maiores fatores de interferência, na propagação de ondas em água pouco profunda, quer isto dizer, que a sua amplitude e direção será diretamente afetada pela batimetria. Existem vários processos, associados à variação de profundidade e irregularidades do fundo, que vão afetar a amplitude e direção da onda, que vão ser estudados no capítulos seguintes. Geralmente, as variações em amplitude e direção induzidas pelo fundo, são suficientemente suaves ao longo da propagação da onda, para que a teoria linear possa ser usada (Holthuijsen, 2017). Para casos em que as variações em amplitude não são tão suaves (como é o caso neste trabalho), a teoria linear deve ser expandida, no entanto, como se está apenas a tentar perceber, quais e de que maneiras estes processos afetam as ondas, e não há dados suficientemente concretos da amplificação do canhão, esta expansão para teorias não lineares não será estudada neste trabalho. Todos os fenómenos estudados em seguida, devem-se às alterações provocadas nas características de propagação da onda, e podem ser estudadas pela teoria linear desde que, as ondas não apresentem um declive muito acentuado ($H/L < 1/20$) ou, não se propaguem em água muito pouco profunda (Holthuijsen, 2017). Como não vai ser estudada a área da rebentação destas ondas, a teoria linear pode servir para descrever os processos que se seguem.

2.3.2 Efeitos na aproximação à costa

Quando as ondas entram em águas costeiras, a sua amplitude e direção vão variar consoante a profundidade, conduzida pela batimetria da região. Neste capítulo vai ser tratado qual o efeito de empolamento, refração e que maneira as correntes e marés afetam as ondas e a sua propagação.

Empolamento (*Shoaling*)

A variação na direção de propagação das ondas, devido a variações na velocidade de grupo nessa direção, é denominado de *shoaling* (Holthuijsen, 2017), frequentemente traduzido como empolamento, uma vez que junto à costa este processo resulta num aumento da altura da onda (como é o caso das

ondas gigantes na Nazaré).

Como foi dito anteriormente, segundo certas condições, a teoria linear das ondas permite explicar estes fenómenos, segundo as equações (2.3 e 2.5), verifica-se que o comprimento de onda vai diminuir com a profundidade, fazendo também diminuir a velocidade de fase (figura 2.6a). Analisando o comportamento da velocidade de grupo com a aproximação do fundo, pelas equações 2.9 e 2.10, constata-se que a velocidade de grupo aumenta inicialmente, mas depois diminui e aproxima-se da velocidade de fase, tomando valores perto de zero junto à linha de costa (figura 2.6a).

A variação destes parâmetros, dificulta a aplicação da teoria linear nestas condições, pois a amplitude tende para infinito (figura 2.6b) (Holthuijsen, 2017). Se considerarmos uma onda, que se propaga pela plataforma continental em direção a uma linha de costa perpendicular à trajetória, a variação de amplitude pode ser determinada por um balanço energético, isto porque considerando um estado estacionário, em que não há perdas de energia por outros processos, a energia da onda conserva-se, podendo a energia apenas entrar e sair pelos planos perpendiculares à direção da onda (figura 2.6 (c)). Se considerarmos o princípio de conservação de energia ($P_2b = P_1b$), em que b é a distância entre os dois planos paralelos à direção de propagação, pode-se determinar a amplitude no segundo ponto (Holthuijsen, 2017):

$$P_2b = P_1b \Leftrightarrow [Ec_g]_2 = [Ec_g]_1 \Leftrightarrow \frac{1}{2}\rho g_2 a_2^2 c_{g,2} = \frac{1}{2}\rho g_1 a_1^2 c_{g,1} \quad (2.11)$$

A amplitude pode ser então calculada por:

$$a_2 = \sqrt{\text{frac}{c_{g,1} c_{g,2}}{a_1}} \quad (2.12)$$

Substituindo o índice 1 por ∞ , que representa águas profundas, e o índice 2 por águas pouco profundas, obtém-se o coeficiente de *shoaling* ($K_{sh} = \sqrt{c_{g,\infty}/c_g}$) (Holthuijsen, 2017).

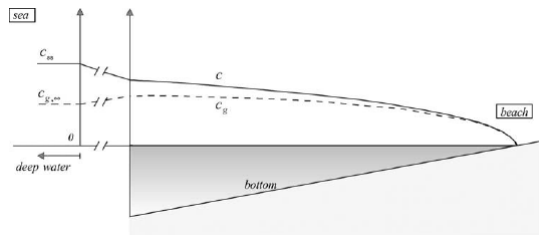
Considerando o efeito de *shoaling*, isolado de todos os outros, este faz com a amplitude da onda inicialmente diminua, e de seguida aumente, tal como acontece com a velocidade de grupo.

Refração

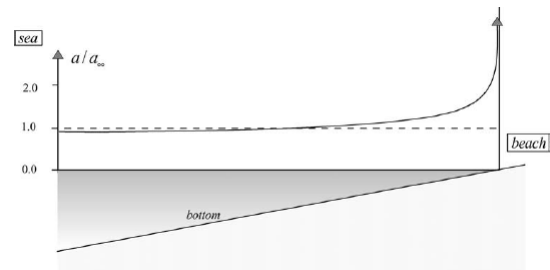
A alteração da direção das ondas, devido ao efeito do fundo denomina-se de refração. Caso exista, uma variação de profundidade ao longo da crista da onda, com uma correspondente variação de velocidade de fase, pode-se considerar o fenómeno da refração (figura 2.7a).

Sabe-se da equação 2.5, que a crista da onda move-se mais rapidamente, em águas pouco profundas do que em águas profundas, se houver variações de profundidade na crista da onda, vai haver parte da mesma que se vai propagar mais rapidamente que a outra, fazendo com que esta sofra uma rotação, na direção da parte da crista da onda onde se propaga mais lentamente (figura 2.7). Este princípio remete para a lei de Snell, que descreve o que foi anteriormente descrito. A lei de Snell para ondas do oceano pode ser dada por:

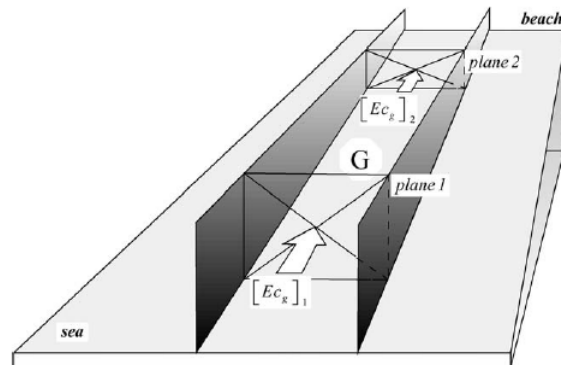
$$c_{deepwater} \sin \theta = \sin \theta_{deepwater} c \quad (2.13)$$



(a) Variação da velocidade de fase e velocidade de grupo com a profundidade



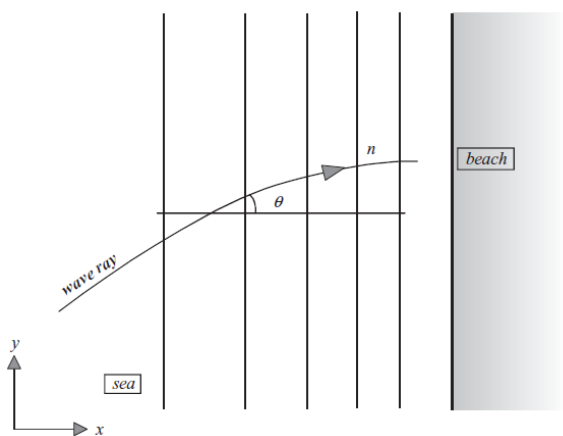
(b) Variação da amplitude com a profundidade



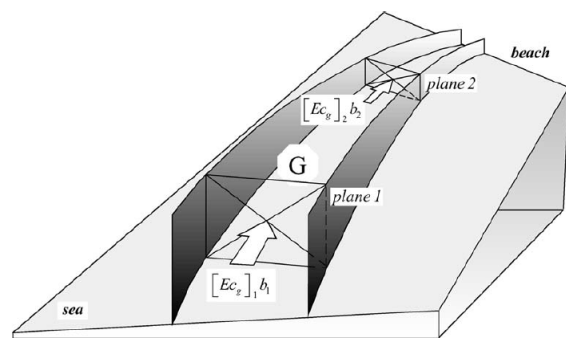
(c) Estruturação gráfica do balanço de energia para uma frente de onda que se propaga do plano 1 para o plano 2

Figura 2.6: Variação dos parâmetros de onda na aproximação à costa (Holthuijsen, 2017)

Esta equação descreve que, junto à costa onde a velocidade de fase é 0 ($c = 0$) (figura 2.7 (a)), o ângulo com a linha de costa também é zero (θ), o que indica que todas as ondas chegam à linha de costa perpendicularmente a esta, independentemente da sua direção inicial. Isto não é o mesmo que dizer que, rebentam todas perpendicularmente à costa, no entanto, este é apenas um resultado teórico, porque na realidade nem em todos os casos isto ocorre, também porque a linha de costa não é regular.



(a) Comportamento da onda seguindo a lei de Snell (linhas paralelas à costa são linhas de igual profundidade) (Holthuijsen, 2017)



(b) Representação do balanço de energia para uma topografia oblíqua (Holthuijsen, 2017)

Figura 2.7: Princípios de Refração numa onda.

A refração também tem impacto na amplitude, para calcular este impacto, é novamente necessário considerar um balanço de energia, do mesmo modo em que foi feito para o *shoaling*, mas agora considerando uma topografia oblíqua (figura 2.7 (b)). Neste caso específico, os planos perpendiculares à direção da onda vão ter dimensões diferentes. O balanço de energia vai agora ser dado por (Holthuisen, 2017):

$$P_2 b = P_1 b \Leftrightarrow [Ec_g]_2 b_2 = [Ec_g]_1 b_1 \Leftrightarrow \frac{1}{2} \rho g_2 a_2^2 c_{g,2} b_2 = \frac{1}{2} \rho g_1 a_1^2 c_{g,1} b_1 \quad (2.14)$$

Temos então o efeito na amplitude estimado por:

$$a_2 = \sqrt{\frac{c_{g,1}}{c_{g,2}}} \sqrt{\frac{b_1}{b_2}} a_1 \quad (2.15)$$

Seguindo o mesmo raciocínio usado para o *shoaling*, pode se definir o coeficiente de refração ($K_{ref} = \sqrt{b_\infty/b}$).

Esta aproximação adequa-se para, uma topografia regular e com um declive baixo, no entanto, isto não se verifica na maioria dos casos, nomeadamente neste caso de estudo. Contudo estas aproximações são importantes, para entender teoricamente todo o processo que explica o enorme empolamento que ocorre. É na base destes coeficientes (K_{sh} e K_{ref}), que é possível determinar a altura de rebentação através de fórmulas empíricas (Caldwell and Aucan, 2007), era por este caminho que passou a primeira ideia deste trabalho, mas como pudemos ver a teoria linear impõe várias condições muito específicas, a juntar à física do problema, estão também as características únicas da geração desta onda.

Correntes e Marés

Tanto as correntes como as marés, podem fazer variar os parâmetros que definem as ondas harmónicas, a amplitude, frequência e direção, estas variações podem ocorrer devido ao empolamento, refração induzida pelas correntes e ainda à transferência de energia da onda-corrente (Holthuisen, 2017). Para estudar o efeito das correntes nas ondas, é necessário considerar a simples hipótese, que estas interagem com as ondas e permanecem inalteradas após esta interação (Svendsen, 2006).

Considerando uma corrente estacionária, e uma onda harmónica a propagar-se através de uma superfície com profundidade constante, é de esperar, que a onda se propague sobre a massa de água que está em movimento satisfazendo a relação de dispersão (Svendsen, 2006):

$$w_r = gk \tanh(kd) \quad (2.16)$$

Esta frequência (w_r), representa a frequência medida por um observador, que se esteja a deslocar com a velocidade da corrente.

A velocidade da onda, é medida perpendicularmente à frente de onda, deste modo a componente da corrente paralela à onda, não vai alterar a velocidade da onda (Svendsen, 2006). Considerando um referencial fixo no espaço, a onda vai se propagar com uma velocidade de grupo absoluta (c_a) na direção de k (figura 2.8) , esta velocidade é dada por:

$$c_a = c_r + k.U \quad \text{ou} \quad c_a = c_r + U \cos(\mu) \quad (2.17)$$

Em que μ , é o ângulo entre a velocidade absoluta e a corrente. O que é possível verificar, é que apenas existe uma translação da onda, com o comprimento de onda a manter-se igual, desse modo é possível escrever que (Svendsen, 2006):

$$w_a = w_r + kU \cos(\mu) \quad (2.18)$$

Apesar de todas estas simplificações, para ser possível descrever a onda, será sempre necessário calcular k através de w_r .

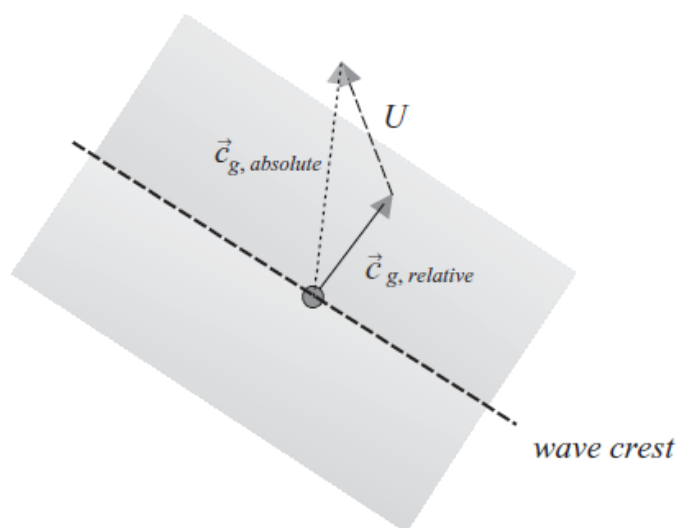


Figura 2.8: Propagação da onda e efeito da corrente com velocidade U (Holthuijsen, 2017)

Anteriormente, abordou-se uma perspectiva, em que a corrente tem uma componente paralela à direção da onda bastante fraca, sendo os efeitos falados apenas a deslocação lateral da frente da onda. Pode-se também, considerar os casos em que a corrente tem uma direção oposta ($U \cos \mu < 0$), ou a favor da frente de onda ($U \cos \mu > 0$).

No caso de uma corrente oposta, considerando que as variações na velocidade da corrente são demasiado lentas para serem consideradas, se uma onda se propagar de uma zona sem correntes para uma zona em que a corrente toma valores opostos ($w_r - U \cos \mu$) toma valores mais elevados, quer isto dizer que para correntes opostas à direção da frente de onda, o número de onda k vai aumentar quanto maior for a intensidade da corrente. Se temos um valor de k elevado, podemos concluir que correntes opostas levam a uma redução no comprimento de onda (Svendsen, 2006), o que leva a um aumento na amplitude da onda. No caso de correntes na direção de propagação da onda, os efeitos são totalmente contrários aos falados anteriormente.

2.4 Parâmetros Espectrais

Antes de se discutir o que é uma “onda”, é necessário recorrer ao termo “estacionaridade estatística”. Requer-se, que uma série de dados da elevação da superfície do mar, seja o mais curta possível, para que se possa considerar que os parâmetros espectrais determinados, sejam estatisticamente estáveis, no entanto, para uma caracterização viável requer-se uma série de dados de um período de tempo muito longo (Holthuijsen, 2017). Geralmente o estado do mar é caracterizado como invariante num período de 15 a 30 minutos.

As condições do mar, considerando as definições apresentadas acima, podem ser caracterizadas por parâmetros que descrevem as ondas, tais como a altura significativa ou período da onda.

Uma descrição mais completa das condições do mar, pode ser aproximada considerando as elevações da superfície do oceano numa serie de dados, como a soma de ondas harmónicas estatisticamente independentes, esta aproximação leva-nos ao conhecido modelo de fase/amplitude. Este modelo, está associado ao conhecido espectro de energia das ondas, que mostra a que frequências, está ligada a variância da distribuição da elevação da superfície do oceano.

Numa série de dados, por exemplo, recolhidos por uma boia ondógrafo, como é o caso deste trabalho, o que se trata são parâmetros referentes às ondas e não as elevações da superfície, que é basicamente a elevação instantânea da superfície do oceano, definir “onda” é considerar o movimento vertical da superfície do oceano sobre uma posição fixa no eixo horizontal (figura 2.9). O retorno de dados pela boia, são parâmetros como a Altura Significativa (H_s), Período de onda (T_w) e a Direção da onda (M_{wd}).

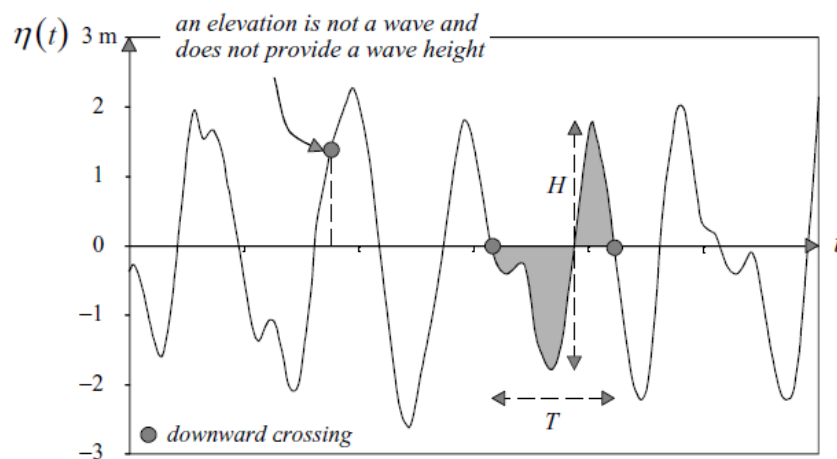


Figura 2.9: Definição de onda. (Holthuijsen, 2017)

Os parâmetros de onda, permitem nos fazer uma caracterização detalhada do estado do mar, no entanto, é possível obter estados do mar diferentes para valores iguais de Altura Significativa e de Período. Por exemplo para um estado do mar que seja gerado localmente (ondas de curto período e irregulares), e que tenha também a influência de um *swell* (ondas longas e suaves, geradas por um vento distante), podem ter os mesmos valores de (H_s) e (T_w) que um estado do mar gerado por vento local sem influência de um *swell* distante. Para uma boa caracterização do estado do mar o ideal será ter os parâmetros locais e referentes a este *swell*.

2.4.1 Altura Significativa

A altura da onda (H), é definida como a distância vertical entre a crista (ponto mais alto), e a cava (ponto mais baixo) da onda (figura 2.9). A onda só pode ter apenas uma altura, num registo de ondas com N ondas, a altura média pode ser definida por:

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad (2.19)$$

O índice i , é o número da onda registada na série de dados. Esta definição é, porém, pouco utilizada, pois pouco corresponde ao que é observado visualmente, o parâmetro que é usado geralmente para caracterizar a altura das ondas, é a Altura Significativa (H_s), que é definida como a média do terço das ondas mais altas registadas, por exemplo numa série com 9 ondas, a Altura Significativa será então expressada pela média das 3 mais altas, como reflete a seguinte expressão:

$$H_s = H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} H_j \quad (2.20)$$

Neste caso, o índice j vai ser baseado na altura da onda ($j=1$ vai ser a onda mais alta, $j=2$ a segunda onda mais alta, etc). Esta parece ser uma maneira estranha, e pouca aproximada pela realidade, mas estudos comprovam que a Altura Significativa é o parâmetro estatístico, que mais se aproxima do observado visualmente, daí os valores de altura da onda estimados visualmente, serem também chamados de Altura Significativa.

A altura significativa pode ainda ser calculada através da área do espetro de ondas, pela fórmula:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (2.21)$$

Em que m_0 é o momento de ordem zero do espetro

2.4.2 Período Médio e Período de Pico

É igualmente intuitivo, definir um período T como o intervalo de tempo, entre o início e o fim da onda (o intervalo entre a passagem no eixo dos imaginário dos x no início e no fim (figura 2.9)). O período médio vai ser então, a média do registos de período registados pelo instrumento em causa:

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (2.22)$$

Em analogia com a Altura significativa, também se pode definir o período de onda significativo como a média do terço dos períodos de maior valor ($T_{1/3}$), e então dado por:

$$T_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} T_j \quad (2.23)$$

Os índices i e j , usados nas equações 2.22 e 2.23. aplicam-se da mesma maneira usada para a altura

da onda média e altura significativa explicados acima.

Através de observações e simulações computacionais, pode ser observado que a níveis de ondulação o período significativo, é aproximadamente igual ao período de pico (T_p) do espectro de onda (obtido através da frequência de pico), ou seja, o período correspondente às ondas mais energéticas do espectro.

2.4.3 Direção Média, Direção Média no Período de Pico e Dispersão no Período de Pico

Tal como já foi referido, os parâmetros referidos anteriormente (2.4.1 e 2.4.2), são obtidos com recurso a equipamento oceanográfico, neste caso as boias ondógrafo, mas também é possível com recurso a sistemas de deteção remota, ainda que com menor precisão. As boias para além de medirem a deslocação vertical, são também direcionais, isto é medem a deslocação horizontal, e retornam a direção da frente de onda que passa por estas.

A Direção Média, é simplesmente a média das direções medidas durante um intervalo de tempo, enquanto que a Direção Média no Período de Pico, corresponde às direções das ondas de maior energia. A Dispersão no Período de Pico, retorna apenas as oscilações na direção que ocorreram nas ondas de maior energia, permitindo identificar se há presença de um ou mais sistemas de ondas.

2.5 Modelo SWAN

O SWAN, é um modelo de ondas de terceira geração, que permite obter estimativas realísticas dos parâmetros de onda para zonas costeiras, lagoas e estuários, sendo primeiramente dadas variáveis como vento, batimetria (figura 2.10), e correntes (SWAN Team, 2007).

Um modelo de terceira geração, é um modelo que tem em conta as interações não lineares entre ondas, a dissipação de energia causada pela rebentação das cristas "*white-capping*" e ainda a influência do vento. Este modelo pode ser usado para qualquer escala de ondas gravíticas.

Um das considerações a ter, quando se desenha um modelo numérico, é o tempo de computação, que vai variar consoante o esquema numérico usado. Geralmente, para modelos que permitem o estudo da propagação de ondas através de um domínio geográfico grande, os esquemas usados são geralmente explícitos e de diferenças finitas (Holthuijsen, 2017), sendo estes os mais simples, robustos e económicos computacionalmente para águas profundas (Döös, 2011). Neste caso, como para outros em que estamos a falar de um modelo para zonas costeiras, estes esquemas tornam-se mais "pesado" computacionalmente, devido ao pequeno intervalo de tempo Δt , o que leva a que o critério de Courant (eq. 2.24) não seja cumprido, esquematicamente falando, uma onda não se pode propagar por mais do que um ponto/parcela geográfica num intervalo de tempo:

$$\Delta t < \Delta x / c_{g,x} \quad \text{and} \quad \Delta t < \Delta y / c_{g,y} \quad (2.24)$$

Onde Δx e Δy , são as dimensões das iterações no espaço nas direções x e y , e c_g a velocidade de

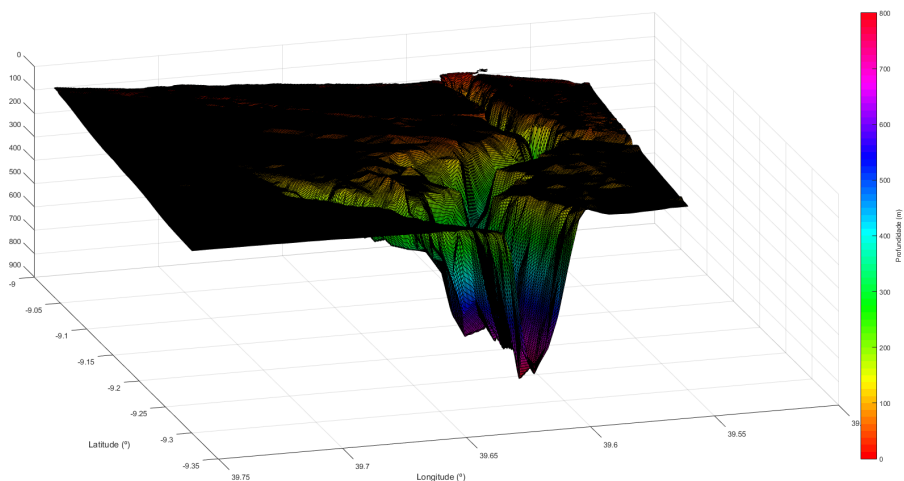


Figura 2.10: Batimetria introduzida no modelo (batimetria fornecida pelo Instituto Hidrográfico).

grupo das ondas de mais baixa frequência no modelo. Para um modelo em oceano aberto, os valores de $\Delta x \approx \Delta y$ variam entre 25-100km, o que leva a um intervalo de tempo Δt entre os 20 e os 80min, para uma frequência mínima de 0.04Hz (Onda com um período aproximado de 25 segundos, correspondente ao período máximo de uma onda que se propaga em água profunda), o que é operacionalmente aceitável (Holthuijsen, 2017). Para modelos costeiros $\Delta x \approx \Delta y$ toma valores como 100m, podendo por vezes chegar mesmo a 10m, dependendo da batimetria da linha de costa. O SWAN é então um modelo baseado em métodos numéricos implícitos, que são sempre estáveis, independentemente dos valores de Δt , Δx e Δy (Döös, 2011), isto não implica que estes sejam escolhidos arbitrariamente, ou seja, têm de ser numa escala muito mais pequena que a escala espacial da zona de ação do fenómeno. As simulações feitas no SWAN podem variar, desde uma complexidade elevada, em que entram variáveis tempo, equação de balanço de energia, em coordenadas esféricas para o simples caso, em a que a equação de energia se aplica a uma dimensão para coordenadas cartesianas (Holthuijsen, 2017). Os efeitos de empolamento, condicionados por aproximação do fundo, correntes induzidas e refração são tidos em conta neste modelo, no entanto, o efeito de difração entra apenas de forma aproximada. O sistema de ondas inicial, é dado por parâmetros estatísticos como os já referidos acima (Altura Significativa, Direção no Período de Pico, Dispersão e Período de Pico), as ondas geradas pelo vento são baseados no mecanismo de realimentação de Miles (Janssen, 1991).

2.5.1 Objetivo de aplicar o SWAN

A necessidade de se aplicar um modelo numérico oceanográfico costeiro, não assentou, no facto de tentar reproduzir o processo gradual que leva à geração de ondas gigantes, processo este que o modelo não consegue resolver, isto porque, não lhe é possível reproduzir a interferência na fase, entre a onda que vem do canhão e a que se aproxima da costa pela plataforma continental (figura 2.11).

O SWAN, vai ser então usado, para perceber as alterações que ocorrem nos parâmetros estatísticos, desde ao largo até à costa, para isso, serão dados valores de entrada recolhidos pela boia MONICAN01.

Estando a boia MONICAN02, dentro do domínio das simulações que serão feitas, tentar-se-à procurar também uma validação do modelo. A área do domínio da simulação e todos os testes feitos está esclarecida na secção 3.2.

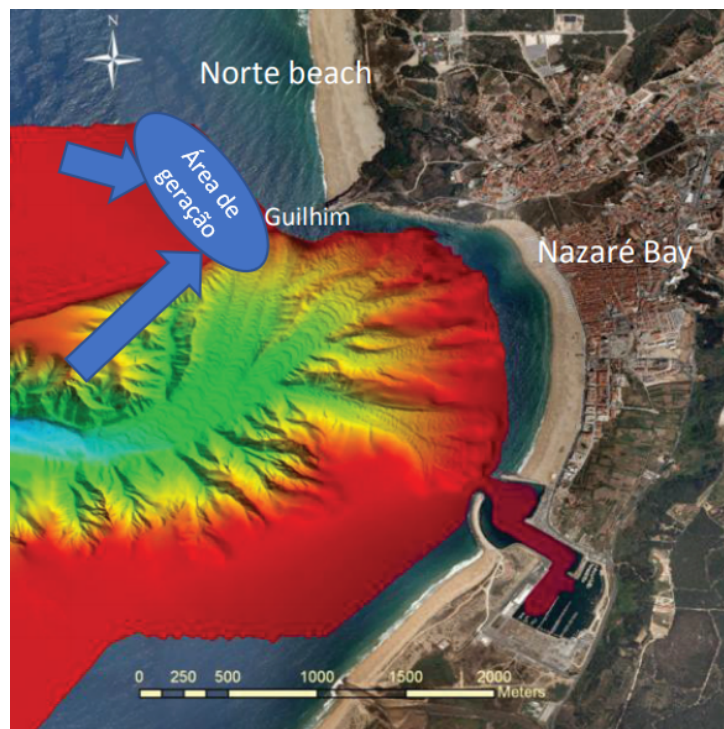


Figura 2.11: Interferência que leva à geração da onda gigante. (Duarte et al., 2014)

2.6 Estatística e Teste de Hipóteses

A base deste trabalho, tem como principal pilar, as datas que correspondem a eventos (dias com ondas de grande proporção). Para entender, o comportamento dos diferentes parâmetros espectrais das ondas, nesses dias, realizou-se testes de hipóteses. Esta foi a maneira encontrada, para através da caracterização estatística destes parâmetros, analisar se estes correspondem ou não, aos dias de eventos que se tem registos. E se para além destes, quais outros dias hipoteticamente obviamente, as condições foram propícias à ocorrência de eventos.

A ideia passou então por, usar o teste estatístico teste-z, para analisar estes dias ou não dias de evento, isto após perceber que os parâmetros apresentavam, uma distribuição de valores, que podia ser aproximada a uma distribuição normal (figura 4.14).

Os testes de hipóteses, passam por aceitar ou não se uma amostra se encontra, dentro ou fora de população descrita por uma média μ e um desvio padrão σ (Massey and Miller, 2006). A hipótese que verifica se a amostra "cai" dentro da população, é a hipótese alternativa (H_0), a hipótese que caracteriza o contrário é a hipótese nula (H_1), as duas hipóteses são testadas uma contra a outra. Dentro deste teste, é definido um intervalo de significância (α), que é a probabilidade de rejeitar a hipótese nula quando esta é verdadeira. O inverso (probabilidade de aceitar H_0 sendo esta hipótese verdadeira),

é definida como erro β , estas definições estão sucintamente explicadas na tabela 2.2. Caso H_0 seja aceita, sendo esta hipótese verdadeira, a probabilidade desta decisão ser verdadeira é dada por $1 - \alpha$, caso seja rejeitada a probabilidade de a decisão estar errada é igual a α . Quando H_0 é aceita, e na realidade está fora da população considerada, a probabilidade de isso acontecer é igual a β , caso seja rejeitada e seja na verdade falsa, a probabilidade de acontecer é de $1 - \beta$.

		Realidade	
		H_0 Verdadeira	H_0 Falsa
Decisões	Aceitar H_0	D. Correta ($1-\alpha$)	Erro tipo II (β)
	Rejeitar H_0	Erro tipo I (α)	D. Correta ($1-\beta$)

Tabela 2.2: Erros associados aos resultados dos testes de hipóteses.

Podem se considerar, testes de hipóteses bilaterais e unilaterais. Os testes de hipóteses bilaterais passam pela suposição mais simples:

$$\begin{aligned} H_0 : \mu &= k \\ H_1 : \mu &\neq k \end{aligned} \tag{2.25}$$

em que μ , é a média da população, e k o valor para essa média. Os testes unilaterais possíveis, podem ser uma das quatro combinações seguintes:

$$\begin{aligned} H_0 : \mu = k & \quad H_0 : \mu = k & \quad H_0 : \mu \leq k & \quad H_0 : \mu \geq k \\ H_1 : \mu > k & \quad H_1 : \mu < k & \quad H_0 : \mu > k & \quad H_0 : \mu < k \end{aligned} \tag{2.26}$$

A teste-z é um teste de hipóteses paramétrico, usado para determinar se um conjunto de dados pertence, a uma população com uma média (μ) e um desvio padrão específico (σ). O teste assume, que a amostra provém de uma população com uma distribuição normal e um desvio padrão conhecido. A teste-z é calculada por:

$$z = \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \tag{2.27}$$

Em que \bar{x} , é a média da amostra em causa e n o tamanho da amostra. O resultado do teste, varia consoante o valor do p -value retirado da tabela de distribuições, através do valor de z . Caso o p -value seja inferior ao nível de significância, o teste rejeita a hipótese H_0 , se for superior a α , H_0 é aceite.

Capítulo 3

Metodologia e Tratamento de Dados

3.1 Análise aos Parâmetros Espetraís

Os dados fornecidos pelo Instituto Hidrográfico (IH), correspondem a ficheiros mensais (.txt) desde Janeiro de 2012 até Dezembro 2017, com os parâmetros medidos (tabela 3.1) de hora a hora. Existem algumas interrupções entre meses, por vezes dias, e em alguns casos algumas horas, para resolver este problema criou-se um vetor tempo, de forma a conseguir uma representação gráfica mais agradável para a análise dados. Os dados da boia MONICAN01, apresentam uma série temporal com menos falhas do que da MONICAN02 (figura 3.1), acontecendo por vezes para certas datas, ter registos de apenas uma das boias. Todas estas considerações foram conseguidas através de uma função matlab, que fosse capaz de abrir todos os ficheiros mensalmente para cada boia, esta função está explícita no Apêndice B.

Parâmetros Estatísticos	Unidades
Altura Significativa	m (metros)
Altura Máxima	m (metros)
Altura Significativa (zero ascendente)	m (metros)
Direção Média	° (graus)
Dispersão no Período de Pico	° (graus)
Direção Média no Período de Pico	° (graus)
Período de onda máxima	s (segundos)
Período Médio	s (segundos)
Período de Energia	s (segundos)
Período de Pico	s (segundos)

Tabela 3.1: Parâmetros contidos nos ficheiros.

Ter apenas uma série de dados, não chega para identificar quando aconteceram os eventos de ondas gigantes, para descortinar as datas deste eventos, foi necessário recorrer a dados da comunicação social, redes sociais e mesmo fotografos. Explorou-se também a comunidade aliada ao surf de ondas gigantes, que acabam por publicar na Internet estas datas em conjunto com fotografias, e ainda às datas fornecidos pelo Dino Carmo. Só assim foi possível, ter a certeza que nestes dias houve mesmo a

ocorrência de ondas gigantes, porque como já foi referido anteriormente, existem certas condições que podem apontar à primeira vista para um dia de ondas gigantes, e este não se proporcionar. As datas consideradas como datas em que ocorreram ondas gigantes estão registadas na tabela 3.2

Anos	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Datas	18 de Out	11 de Jan	19 de Nov	15 de Out	2 de Fev	8 de Fev
	14 de Nov	23 de Jan	20 de Nov	27 de Out	4 de Fev	10 de Fev
		28 de Jan	29 de Nov	30 de Out	24 de Out	28 de Fev
		29 de Jan	11 de Dez	1 de Nov	16 de Dez	24 de Set
		30 De Jan	12 de Dez	12 de Nov	17 de Dez	16 de Out
				13 de Nov	20 de Dez	18 de Out
				30 de Nov	22 de Dez	21 de Out
				21 de Dez		22 de Out
				23 de Dez		25 de Out
				24 de Dez		6 de Nov
						8 de Nov
						9 de Nov
						12 de Dez
						15 de Dez
						16 de Dez
						30 de Dez
nr de eventos	2	5	5	10	7	16
nr total de eventos: 45						

Tabela 3.2: Datas em que foi noticiada a ocorrência de ondas gigantes.

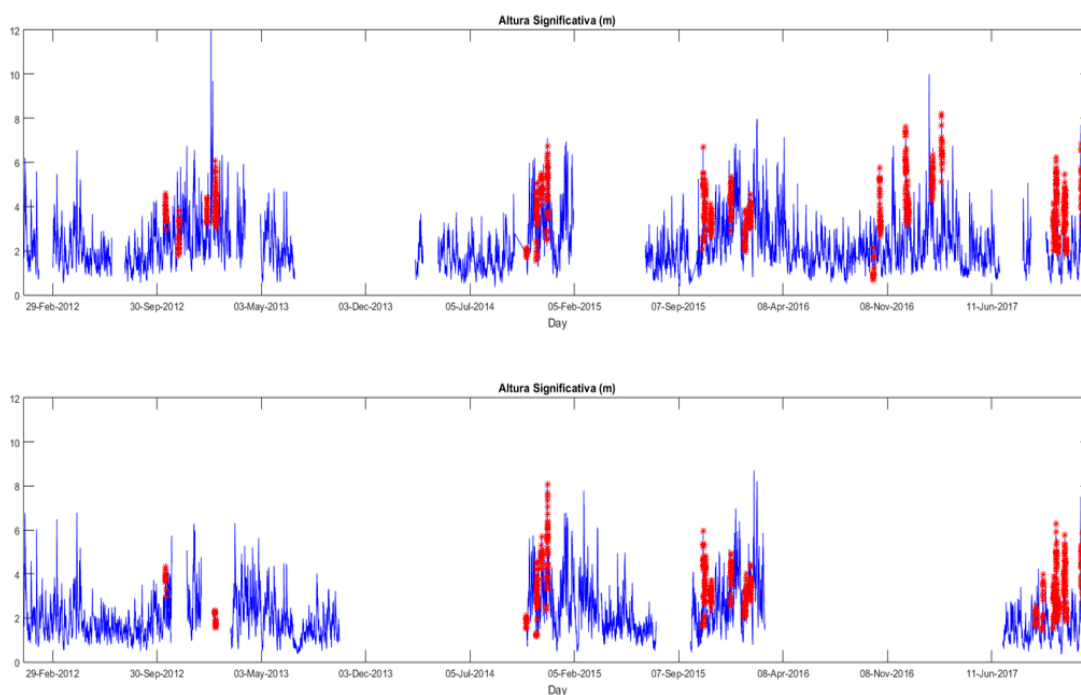


Figura 3.1: Série Temporal para Altura Significativa, com os eventos assinalados a vermelho (considerando um dia inteiro) para MONICAN01(cima) e MONICAN02(baixo)

Inicialmente, analisando a localização das boias, esperava-se uma diferença nos parâmetros registados por cada um das boias, principalmente na altura significativa, direção média e período, isto porque se esperava que um dos efeitos de empolamento da onda (galgamento do canhão), fosse sentido na boia MONICAN02, no entanto isto não se verificou (tabelas 3.3 e 3.4). Pode-se ver através das equações 2.3 e 2.4, que este efeito só é verificado para algumas ondas. Caso a onda que entra no canhão, tenha um comprimento de onda (L) de aproximadamente 180m, correspondente a um período de aproximadamente 10.7s para 90m de profundidade, profundidade a que está localizada a MONICAN02, estamos a falar de valores que ainda correspondem a águas profundas. Nas ondas de evento os períodos vão rondar os 15s, onde o fundo já se deverá fazer sentir, contudo não com muita intensidade, pois estas ondas vêm de profundidades maiores. Os valores para ambas as boias são então muito similares após feita uma análise geral.

Daqui em diante, passou-se apenas a analisar os dados da boia MONICAN01, por ter um maior número de registos, e assim não se perder o registo de certos eventos como já se viu anteriormente na figura 3.1, e se pode ver nas tabelas abaixo.

BOIA MONICAN 01	Média	Max	p25	p75	std
Altura Significativa (m)	2.3	12.7	1.5	2.9	1.15
Direção Média (°)	317	-	303	338	28.9
Direção Média no Período de Pico (°)	310	-	298	334	44.9
Dispersão no Período de Pico (°)	27	-	23	31	7.3
Período Médio (s)	7.0	13.8	5.7	8.03	1.59
Período de Pico (s)	11.0	25.0	9.0	12.8	2.69
Número de dados: 36846					

Tabela 3.3: Registos MONICAN01.

BOIA MONICAN 02	Média	Max	p25	p75	std
Altura Significativa (m)	2.1	8.7	1.3	2.7	1.10
Direção Média (°)	314	-	301	332	21.8
Direção Média no Período de Pico (°)	311	-	296	329	25.5
Dispersão no Período de Pico (°)	24	-	20	28	6.8
Período Médio (s)	7.2	15.5	6.0	8.3	1.66
Período de Pico (s)	11.0	25.1	9.0	12.8	2.72
Número de dados: 27756					

Tabela 3.4: Registos MONICAN02.

Após uma análise muito geral, em ambas as boias, onde se viu o número de dados, interrupções temporais, fatores de qualidade (sempre com o valor máximo para todos os registos), e ainda as diferenças de boia para boia, começou-se então a analisar as datas dos eventos. Não tendo as horas específicas a que estes ocorreram, consideraram-se inicialmente as 24h do dia em causa, no entanto, verificou-se que por vezes, as condições do mar propícias à ocorrência de ondas gigantes, apenas se mantinham em parte do dia, ou apenas acontecia em certas partes do dia (figura 3.2). Como tal, tentou-se definir

certas limitações, que garantissem uma eliminação parcial de certas horas dos dias de eventos, e assim se pudesse analisar apenas as características dos parâmetros, durante a ocorrência destes eventos. Inicialmente, definiu-se uma condição básica que era considerar como valores para ocorrência do evento, alturas significativas acima de 3.4m (valor obtido através da diferença entre a média dos dias de eventos, sem alterações, e o desvio padrão), isto levou a cortes na série temporal. As horas de evento num dia de ocorrência, não ficavam seguidas e podia-se estar a perder características correspondentes a um dia de ondas gigantes, sem ser a altura significativa. Entendido que esta não era uma boa condição, a análise passou a ser feita com vista, ao dia anterior ao evento e ao dia do evento como se pode ver na figura 3.2, para tal, foi necessário recorrer a vários fatores para uma análise precisa. De destacar ainda, que valores muito elevados de altura significativa podem não ter sido considerados como dias de evento, por não ter havido prática de surf, pela falta de dados, ou por ser um dia onde para além da ondulação vinda do Atlântico Norte, tem ainda um vento muito forte característico de tempestades que geram uma vaga local intensa.

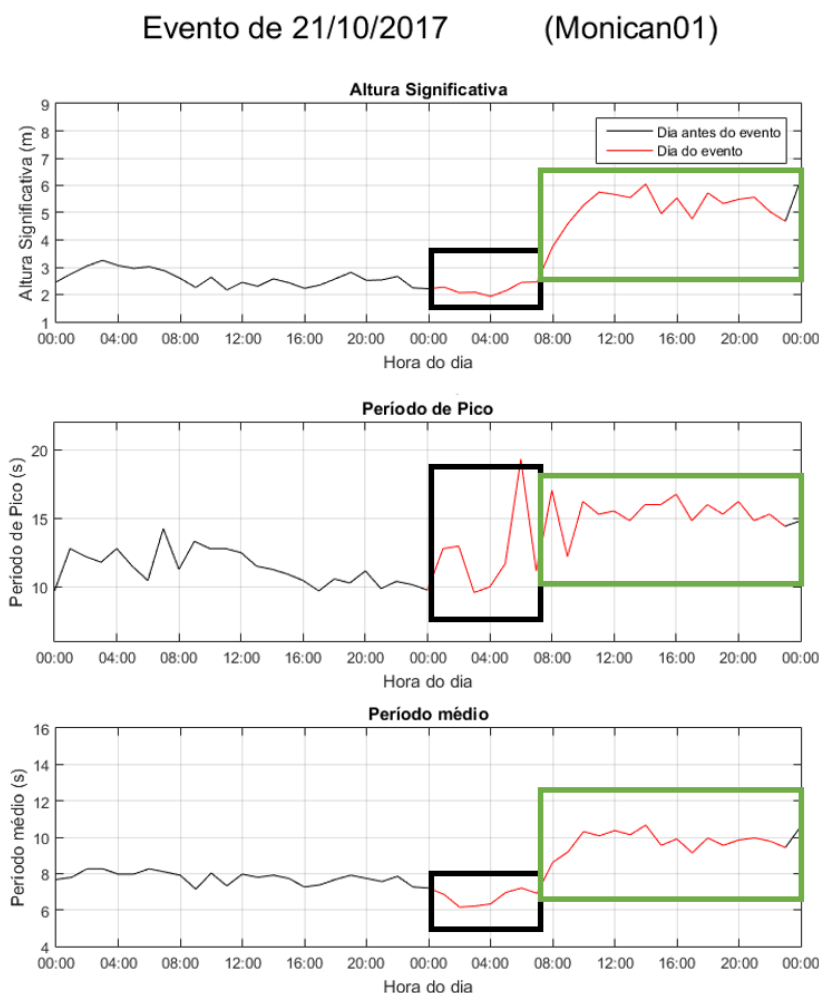


Figura 3.2: Variáveis Altura Significativa, Período de Pico e Período médio para o dia antes e dia do evento, a janela a preto indica que as condições não são favoráveis à ocorrência de ondas gigantes e a verde um registo correspondente à ocorrência de ondas gigantes

Para que seja possível entender como tudo se processa, pouco antes, e quando há o acontecimento deste fenómeno, começou-se por criar uma matriz com todos os dias anteriores ao evento (A), e outra

com os dias dos eventos (B). A partir daqui fez-se várias alterações a estas matrizes. Para “limpar” a matriz A, o primeiro passo foi retirar os dias seguidos, por exemplo, se houve ocorrência de ondas nos dias 28 e 29 de Janeiro de 2013 (tabela 3.2), na matriz A vão entrar os dias 27 e 28, neste caso retira-se então os dados de 28. Pode-se ver uma análise mais crítica a estas matrizes no próximo capítulo.

Concluiu-se também que, na maior parte das vezes, um pico no registo temporal do período de pico, indicia a chegada da ondulação que trazia o sistema que levava à geração de ondas gigantes, que será discutido na secção (3.1.1), daqui aplicou-se então uma nova condição, que caso houvesse uma diferença de 3 segundos (valor obtido através da diferença, entre a média e o desvio padrão de das variações de período pico para dia de evento) no período de pico de uma hora para outra, os dados que estavam colocados anteriormente a essa hora, seriam então apagados, isto no caso da matriz B. No caso da matriz A, se se verificasse esta diferença no período de pico, os dados são apagados desde esse pico até ao final do dia. A partir daqui, partiu-se para condições limite, aplicou-se agora um limite inferior de 2.5m para a altura significativa (na matriz B), e ainda após uma análise mais precisa a todos os eventos, definiu-se outra condição neste caso considerando que os eventos apresentam todos um período de pico superior a 12 segundos. O porquê de usar estes valores é explicado na secção 4. Recapitulando, definiu-se como *thresholds* as seguintes condições:

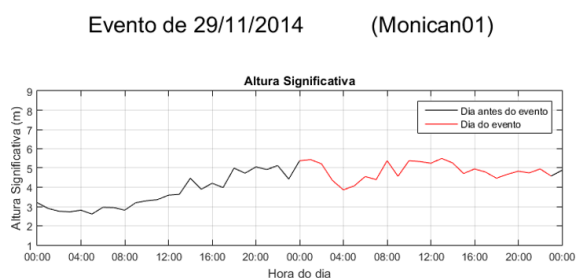
1. Remoção dos dias consecutivos na matriz de dias anteriores (A)
2. Considerando o início do evento como o pico no registo temporal do período de pico
3. Dados com altura significativa abaixo de 2.5m não considerados como eventos
4. Dados com período de pico abaixo de 12s não considerados como eventos

Estas condições, não foram implementadas para os dados em geral, para se poder tirar conclusões dos comportamentos sem perder características que possam ser importantes. Estas matrizes foram apenas usadas para, tirar valores estatísticos para os dias de evento e para os dias de não evento, e para perceber o comportamento dos parâmetros nestes dias mais próximos. Estes dados vão desempenhar um papel importante nos testes de hipóteses, pois conseguem dar informações dos dias de eventos apenas para as horas de evento.

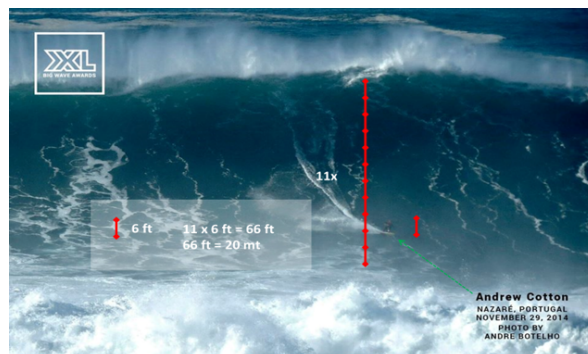
3.1.1 Altura Significativa

Na análise à altura das ondas, é importante entender, que a altura significativa medida pela boia MONICAN 01, a 50km da costa, não vai corresponder à altura das ondas que rebentam junto à costa, o fator de empolamento pode ser aproximadamente entre 2x a 4x sobre o valor. Uma altura significativa de 5m medida pela boia, pode corresponder a ondas que possam ter dimensões entre os 10 e os 20m na zona de rebentação já junto à costa na Praia do Norte (figura 3.3). Estes valores vão depender não só da altura significativa naquela hora, mas também das condições de interferência, daí a tão grande incerteza na dimensão deste tipo de onda.

A tabela 3.1, mostra que existem dois parâmetros para expressar a altura significativa, o primeiro deles corresponde ao valor calculado através do espetro de ondas (eq. 2.21), o segundo (método do zero



(a) Registos para 29/11/2014



(b) Onda Surfada no dia 29/11/2014 (foto: Alex Botelho)

Figura 3.3: Diferença entre os registos de altura significativa medidos na boia ($\approx 5\text{m}$) (a) e altura da onda a rebentar junto à costa ($\approx 20\text{m}$) (b).

ascendente), é proveniente das alturas das ondas medidas pela deslocação vertical da boia, e de seguida calculado como está descrito em 2.4.1. Optar por ou um outro parâmetro é irrevelante, desde que se use o mesmo para toda a série de dados por razões de consistência, no entanto, foi escolhido o valor de altura significativa espectral, por conveniência de no futuro haver a possibilidade de olhar para o espectro de ondas para tirar algumas conclusões.

Existiu também a possibilidade de se analisar a altura máxima, mas visto que se procuram condições estáveis, e não algo que aconteceu numa hora específica, a altura significativa permite fazer uma análise mais precisa nesse ponto.

3.1.2 Direção, Dispersão e Período

A direção das ondas é um dos fatores mais importantes de estudo, visto que a ocorrência destes fenómenos está associada a um *swell*, com uma direção muito específica WNW/NW. A estes parâmetros e aos restantes parâmetros direcionais (Direção no Período de Pico e Dispersão), os dados não foram filtrados diretamente (eliminar certos dias/horas a partir de valores de direção e/ou Dispersão). À direção Média e Direção no Período de Pico, apenas foi estendida a escala de 360° para 400° , isto porque deste modo, torna-se mais fácil analisar as variações de direção com o tempo, sem perder o que acontece quando as direções tomam valores entre os 350° e os 20° graus por exemplo. O que foi feito foi “puxar” os valores mais baixos, entre 0° e 40° para valores entre os 360° e os 400° , o que não se afasta da realidade, porque a costa ocupa aproximadamente ângulos entre os 20° e os 180° , e não existem ondas a vir de terra.

3.2 SWAN (Simulações)

As simulações no SWAN foram feitas primeiramente para um domínio suficientemente grande (figura 3.4 (cima)), para se inserir as condições fronteira, e os resultados desta simulação são depois usados para uma simulação num domínio mais local (figura 3.4 (baixo)). Os resultados destas duas figuras

provêm, de um ficheiro de teste, que serviu como base para uma melhor compreensão do programa, nestes ficheiros está ainda introduzida a batimetria ilustrada na figura 2.10.

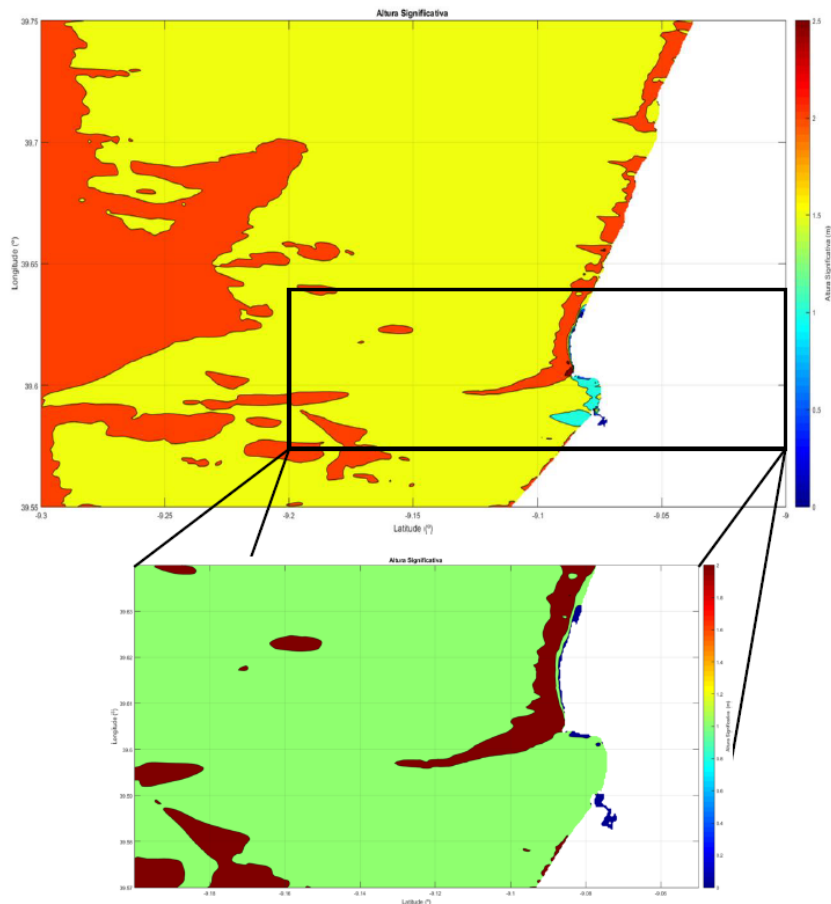


Figura 3.4: Domínio Inicial (cima) e Domínio Local (baixo) usados nas simulações SWAN

A resolução espacial usada, é de 0.3° para latitude e 0.2° para longitude, para o primeiro domínio, e é de 0.15° para latitude e 0.2° para longitude, para o domínio local. O seu espectro de ondas, é caracterizado por 36 frequências (períodos) igualmente espaçadas, de 0.033Hz (30s) a 0.6Hz (1.7s) . As variáveis climáticas inseridas no modelo, contemplam apenas, o vento com a intensidade (m/s) e direção ($^\circ$), que foram alternados consoantes as simulações.

As condições fronteira, foram estabelecidas de igual modo para as fronteiras W, N e S enquanto que a fronteira E ficou apenas pela barreira física (no ficheiro teste é forçado um valor aproximado para a zona de rebentação). Estas condições fronteira foram em grande parte dos testes, valores recolhidos pela MONICAN01, e considerando que a ondulação em dia de evento, está sempre inserida num ramo WNW/NW, estas seriam as condições fronteira que mais se aproximariam de um cenário real.

Os *outputs* retornados pelo SWAN, foram Altura Significativa, Período de Pico, Direção média, Direção no Período de Pico, Dispersão, Declividade e o espectro direcional em vários pontos das malhas.

A validação deste modelo, tentou ser obtida quando inseridos dados que coexistiam nas duas boias, estando uma fora do domínio, MONICAN01, servindo para condições fronteira, e outra dentro do domínio, a MONICAN02, que se adequa para a validação do modelo.

Todas as simulações feitas estão descritas na tabela 3.5. Estas simulações são feitas, com base nos

dados recolhidos pela MONICAN01, e também consoante os resultados que foram analisados, foram se alterando as variáveis (altura significativa, direção no período de pico, período de pico, dispersão) procurando um resultado próximo da realidade.

Simulação	Fronteiras	HS	TP	DIR	DSPR	VENTO
Teste	N,W,S	2	10	280	10	-
	E	3.44	9.77	230.8	4.9	-
1	N,W,S	8.17	20.5	320	15.46	-
2	N,W,S	8.17	20.5	320	15.46	10.92 / 208
3	N,W,S	7.09	19.7	328	16.20	-
4	N,W,S	7.09	19.7	328	16.20	10.92 / 208
5	N,W,S	6.05	16.0	302	21.09	-
6	N,W,S	6.05	16.0	302	21.09	5.00 / 70
7	N,W,S	5.70	17.0	337	23.20	-
8	N,W,S	5.70	17.0	337	23.20	4.02 / 350

Tabela 3.5: Simulações feitas no SWAN com respetivos INPUTS.

Capítulo 4

Resultados

4.1 SWAN

O modelo SWAN, como já foi referido, não foi usado com o intuito de retirar um *output* que permitisse, determinar as condições ideais de ocorrência, mas sim, tirar conclusões, que ajudassem na discussão dos resultados, e permitissem também ter uma noção da propagação espacial das ondas nesta região. Ao introduzir valores recolhidos pela boia MONICAN01, para eventos mais extremos, o SWAN resolve as variações de altura significativa, direção e dispersão com a batimetria no entanto, isto não acontece para o período de pico, como podemos ver na figura 4.1. Nesta figura foram introduzidos os valores, referentes ao teste 1 explícito na tabela 3.5.

Os efeitos, de refração e empolamento, causados pela irregular batimetria e pelas elevadas profundidades, junto à costa, são bem notáveis quando analisadas as figuras 4.1a e 4.1e, com o máximo de altura significativa, a aparecer a noroeste da cabeça do canhão. Este máximo, é o reflexo do empolamento causado pelo “galgamento” do canhão, das ondas que refrataram neste em direção à praia do Norte, estas ondas de WSW/SW, vão se encontrar com as ondas que estão a entrar de WNW/NW, levando a um aumento ainda maior da altura da onda. O efeito do canhão, na direção das ondas, é visível na figura 4.1b, com a rotação em direção à praia do Norte bem clara. Outro parâmetro igualmente importante, nesta análise, é a dispersão, com os valores máximo, na zona de maior altura significativa, devido à interação entre as duas frente de onda, que com direções diferentes, vai resultar numa dispersão com valores máximos para este espaço em análise.

As duas frentes de onda, que coexistem, e caracterizam este sistema tão específico na costa da Nazaré, também são passíveis de ser observadas através do modelo SWAN, pela análise de espetros direcionais (figura 4.2). Num dia de evento, em que o grupo de ondas entra com uma direção WNW/NW, com as ondas de maior energia a terem um período de aproximadamente 20s (figura 4.2a), a batimetria vai começar a provocar um espalhamento destas ondas de maior energia, para um raio de direções entre os 240°(SW) e os 330°(WNW/NW) (figura 4.2b). Com a aproximação à costa, e numa zona mais próxima entre a fronteira, entre o canhão submarino e a plataforma continental (figura 4.2c), é agora visível, a repartição da frente de onda inicial em duas, com as ondas de maior energia, ainda a serem as

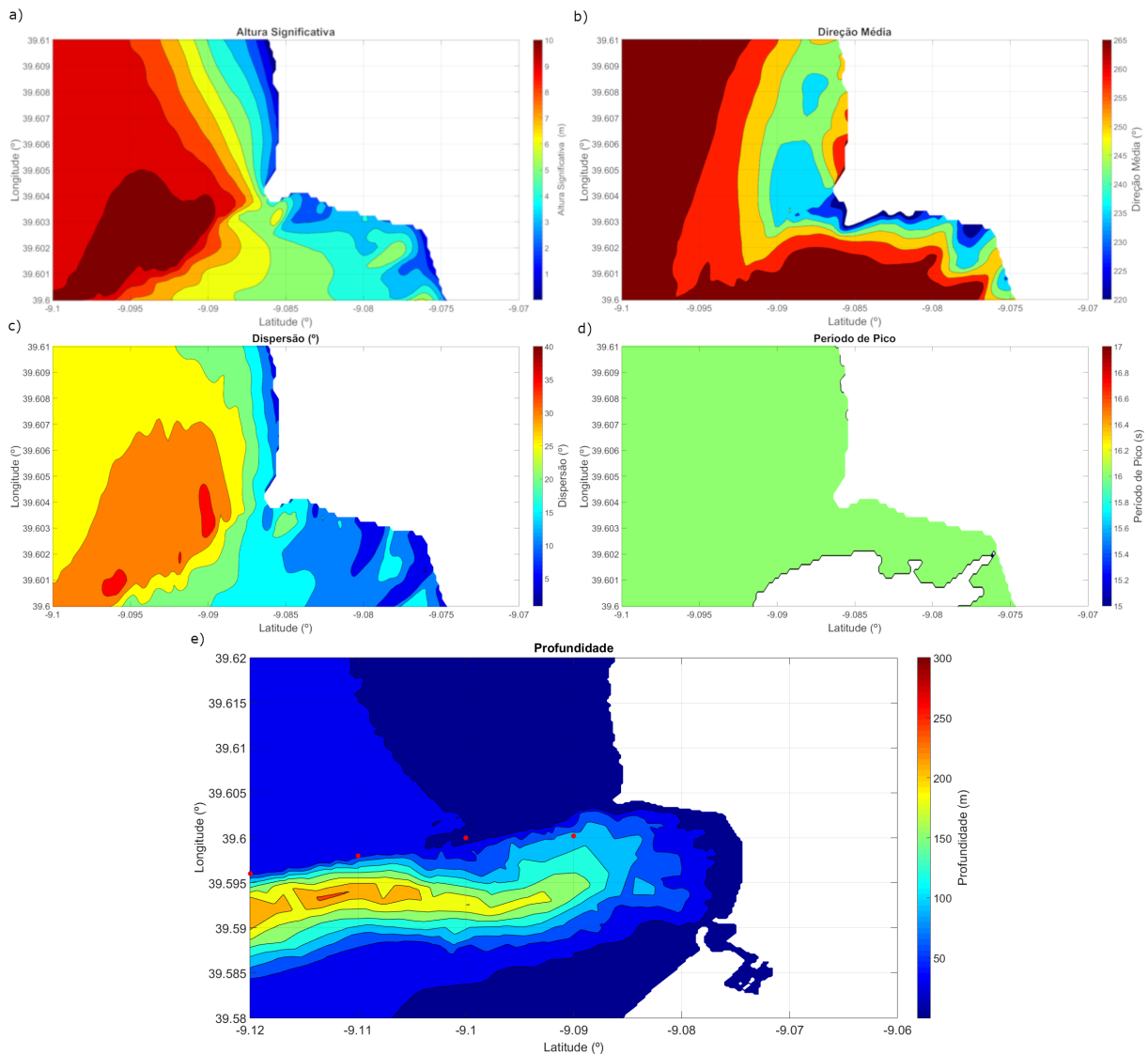


Figura 4.1: Altura Significativa (a), Direção Média (b), Dispersão (c), Período de Pico (d) obtidos a através do SWAN para uma batimetria fornecida pelo Instituto Hidrográfico (IH) (e), para o domínio local numa janela ainda mais próxima da costa. Os pontos a vermelho na figura 4.1e correspondem aos locais b), c), d) e e) onde foi calculado o espectro direccional.

que provém do *set* de ondas inicial. Constata-se também, que o espectro começa a ficar mais disperso, a apanhar frequências mais altas (períodos mais curtos), correspondente às ondas que começam a sentir o fundo, reduzindo o seu comprimento de onda, e aumentando a energia nos períodos 10s, devido ao empolamento das ondas nesta região. Esta mancha é mais notável para as ondas que vêm de WNW/NW, com naturalidade, pois são estas que sentem o fundo, sendo que neste ponto onde o espectro é calculado, as ondas não foram afetadas pelo canhão. Nas figuras (4.2d e 4.2e), mostram a rotação para W da direção do swell inicial, devido à presença do fundo da plataforma continental, e desenham ainda a frente de ondas proveniente da cabeça do canhão, sendo que esta é mais intensa e concentrada pouco antes ($9.10^{\circ}W$) deste ponto, do que propriamente no “final” do canhão ($9.09^{\circ}W$). O espectro d) apresenta duas frentes de onda bem desenhadas, e com as ondas de maior energia com períodos a rondas os 20s, e ainda com as ondas de maior frequência (períodos a rondar os 10s)

também a representarem já parte da energia deste espectro. O espectro e), tem características similares ao d), mas neste caso há uma dispersão das ondas maiores, com as ondas que provêm do canhão a representarem um alcance de direções maiores.

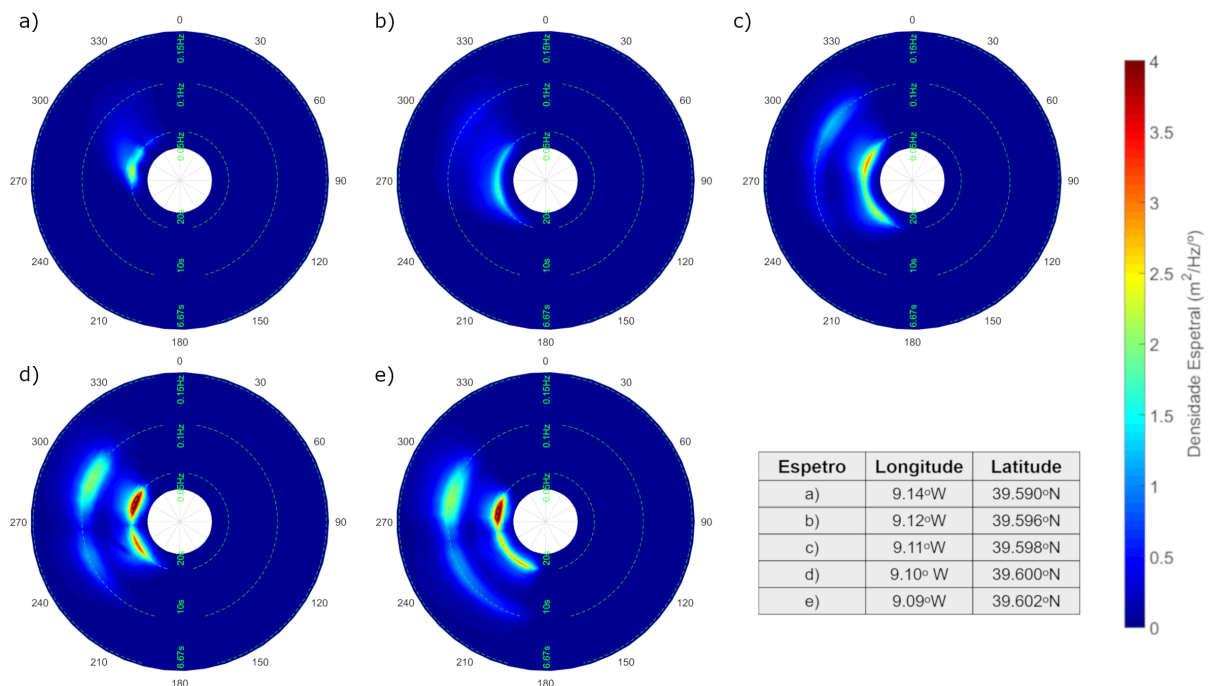


Figura 4.2: Espectro Direccionais calculados em diferentes pontos (os pontos b), c), d) e e) estão representados a vermelho na figura 4.1) com recurso ao SWAN, com os valores de entrada correspondentes ao teste 3 da tabela 2.2

A junção das duas frentes, é a interferência que vai resultar na onda característica desta região, que quando esta interferência acontece forma um pico no centro da rebentação (fig. 4.3), este tipo de onda tornou a Nazaré muito famosa pela sua proporção, no entanto, ocorre também noutros sítios como Newport Beach, California, ainda que claro com condições de interferência e dimensões diferentes.



Figura 4.3: Onda gerada pela interferência de duas frentes de onda ("Wedge") na Nazaré (Foto: Vitor Estrelinha).

4.2 Parâmetros Espetraís

Quando se procedeu à análise dos parâmetros espetraís, foi necessário verificar as datas obtidas para dia de evento (tabela 3.2). Poderia haver, o caso em que não houvesse dados para essas datas ou, dias que na verdade não foram eventos (valores de altura significativa muito baixos a rondar a média de um dia normal), como tal as datas que ficaram então comprovadas como realmente datas de evento, estão representadas na tabela 4.1.

Anos	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Datas	18 de Out	11 de Jan	19 de Nov	27 de Out	2 de Fev	8 de Fev
	14 de Nov	23 de Jan	29 de Nov	12 de Nov	4 de Fev	10 de Fev
		28 de Jan	11 de Dez	30 de Nov	24 de Out	28 de Fev
		29 de Jan	12 de Dez	21 de Dez	16 de Dez	24 de Set
				23 de Dez	17 de Dez	16 de Out
				24 de Dez	20 de Dez	18 de Out
					22 de Dez	21 de Out
						22 de Out
						25 de Out
						8 de Nov
						9 de Nov
						12 de Dez
						15 de Dez
						16 de Dez
						30 de Dez
nr de eventos	2	4	4	6	7	15
nr total de eventos: 38						

Tabela 4.1: Datas dos eventos filtradas para a série de dados.

Antes de se “filtrar e limpar”, os dados brutos recolhidos pela boia, analisaram-se os mesmos, estudando os seus comportamentos em dias considerados como normais (dias em que não ocorreram eventos) (figura 4.4), e em dias de ondas grandes (figura 4.5).

Nos dias em que a ondulação foi considerada como pouco significativa na Praia do Norte, a altura significativa incide maioritariamente entre os valores de 1m a 3m. A gama de direções para os dias de não evento, é descrita por uma janela relativamente curta entre os 290°(NW) e os 350°(NNW), existem também algumas ondas entre o quadrante sul e oeste mas que ocorrem com menos frequência. Os valores de maior frequência para o Período Médio, estão localizados entre os 5s e os 8s, valores normais para a distribuição da altura significativa, nestes dias o *swell* que entra na praia do Norte não tem muita intensidade, e por vezes a vaga pode até sobrepor-se a esta fraca ondulação. O Período de Pico apresenta valores mais significativos, sendo os valores mais frequentes são entre os 8s e os 12s, podendo a atingir valores mais altos pelas razões referidas acima, que podem estar dias de evento incluídos nesta série de dados. A dispersão, é dos parâmetros analisados o mais irregular de todos, porque está a medir a instabilidade da direção das ondas na área, e como se pode ver pelo histograma, tem um alcance consideravelmente grande, apesar dos valores principais se localizarem entre os 18° e

os 30°.

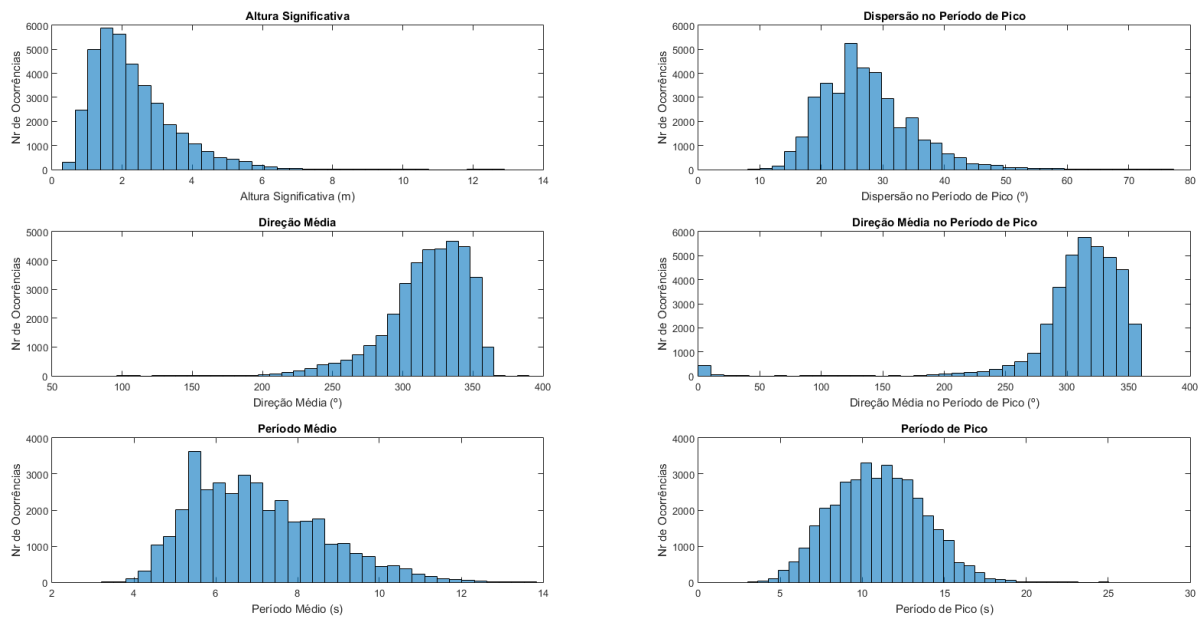


Figura 4.4: Histograma para os vários parâmetros estatísticos para os dias considerados como "normais"

Quando se analisa, os dias em que houve ocorrência de ondas grandes (figura 4.5), existe para os valores quantitativos, uma translação para valores mais elevados, e que agora os parâmetros apresentam maior irregularidade de frequência. O número de total de dados, também é menor para os dias de eventos, justificando também, em parte, esta dispersão de frequências.

A altura significativa, apresenta agora como valores com maior frequência as alturas entre os 3.5m e os 4.5m, mas com um alcance que vai dos 1.5m até quase aos 10m. Os valores mais altos (6m-9.5m) correspondem aos eventos de maior dimensão, que ocorrem com maior frequência na estação de inverno oceanográfica (Setembro-Fevereiro). O Período Médio ocorre agora em valores similares ao Período de Pico em dias normais, com valores mais frequentes entre 9s e os 11s, enquanto que o Período de Pico é mais incidente em valores entre 13.5s e os 17s, a chegar por vezes a valores entre os 20 a 22s. Os termos direcionais em dias de evento, sofrem um estreitamento da suas janelas de direções com a direção média a revelar-se um pouco irregular (está-se a considerar as 24h do dia de evento), ainda assim, os valores que ocorrem mais vezes estão localizados entre os 300° e os 340°. A Direção Média no Período de Pico tem um encurtamento mais claro da sua janela, no entanto, em valores medidos horariamente é bastante irregular (ver Apêndice C), este parâmetro tem uma janela entre os 300° e os 340°. A Dispersão no Período de Pico, apresenta como valores de maior ocorrência, valores mais baixos mas aproximadamente iguais a um dia normal, estando estes agora localizados entre os 18° e os 28°.

É possível, ver a relação entre, a altura significativa e a direção média para dias normais e dias de evento, através da figura 4.6. Os valores de altura significativa em dia normais, são muito mais baixos que em dia de evento, e a direção tem uma dispersão muito maior. Não existe uma direção característica, para cada valor de altura de onda nos dias normais, o que seria de esperar, visto que os

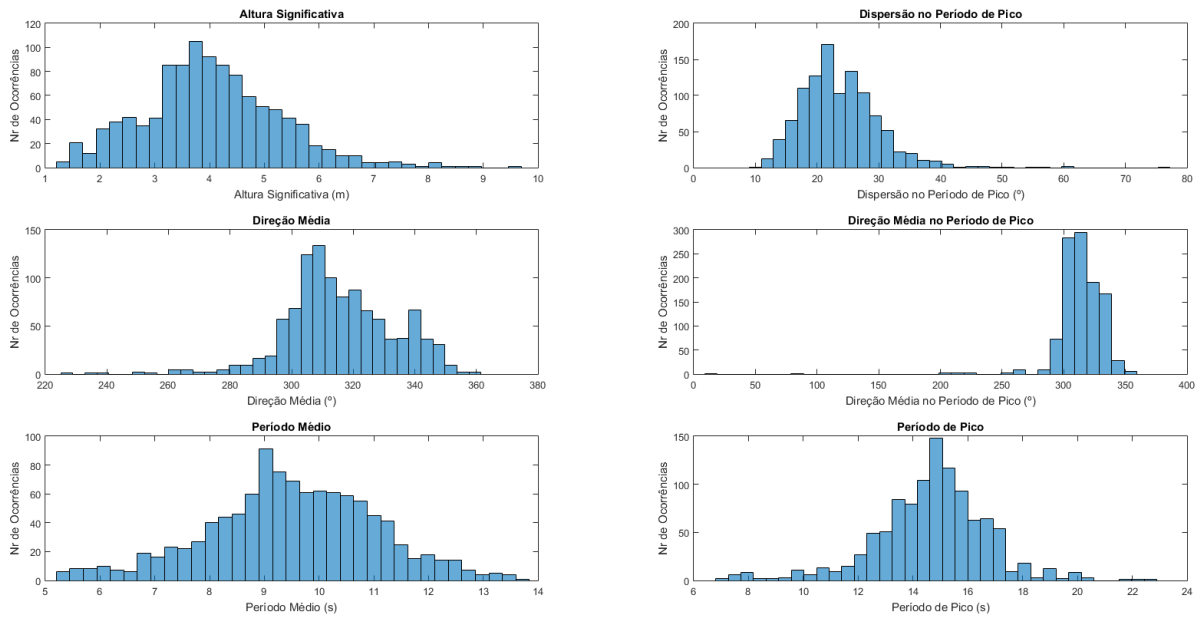


Figura 4.5: Histograma para os vários parâmetros estatísticos para os dias considerados como de “ondas grandes”

valores de altura significativa também abrangem uma escala pequena. Em dias de evento, para além da janela de direções ser mais estreita, podemos ver que as ondas de maior amplitude (8-10m), ocorrem para direções mais inclinadas para norte (310°-330°).

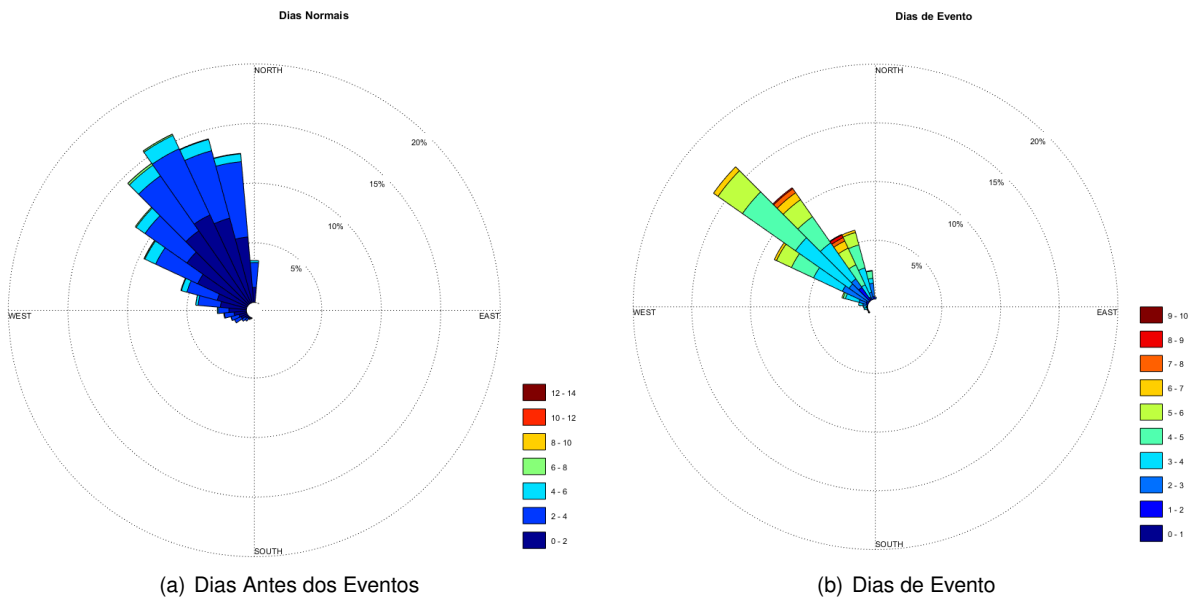


Figura 4.6: Valores de altura significativa para cada intervalo de direção média.

Partindo do ponto, que os dados principalmente para os dias de evento, representam uma amostra pequena e, com uma dispersão de valores de parâmetros grande, justifica-se este intervalo alargado de valores, com o facto de não se estar a analisar, apenas as horas em que as condições foram as ideais para a ocorrência de ondas gigantes. Tal como foi descrito no capítulo 3.1, resolveu-se fazer uma análise crítica ao que acontece no dia antes do evento, e no dia do evento, e filtrar os

valores que não são consideráveis para a ocorrência deste fenômeno, através das condições explicadas acima. Contrastando primeiramente o que acontece no dia anterior e no dia do evento (figura 4.7), é possível ver que tanto para um dia como para o outro, os valores coexistem em praticamente todos os intervalos, em todos os parâmetros. Já fora constatado anteriormente, que nos parâmetros direcionais as diferenças não eram relevantes, de dia de não evento para dia de evento, o que também coincide neste caso, contudo na altura significativa é possível ver que os valores de altura significativa, em dia anterior ao evento, abrangem parte dos valores dos dia de evento e vice-versa, o mesmo acontece com o período de pico e período médio. Isto explica que os eventos podem começar no dia anterior ao registrado na base de dados, ou pode começar apenas mais tarde no dia de referência, este foi o principal motivo, para o qual se aplicou as várias condições descritas no capítulo 3.1, para ficar apenas com as informações das horas em que estão a decorrer os eventos.

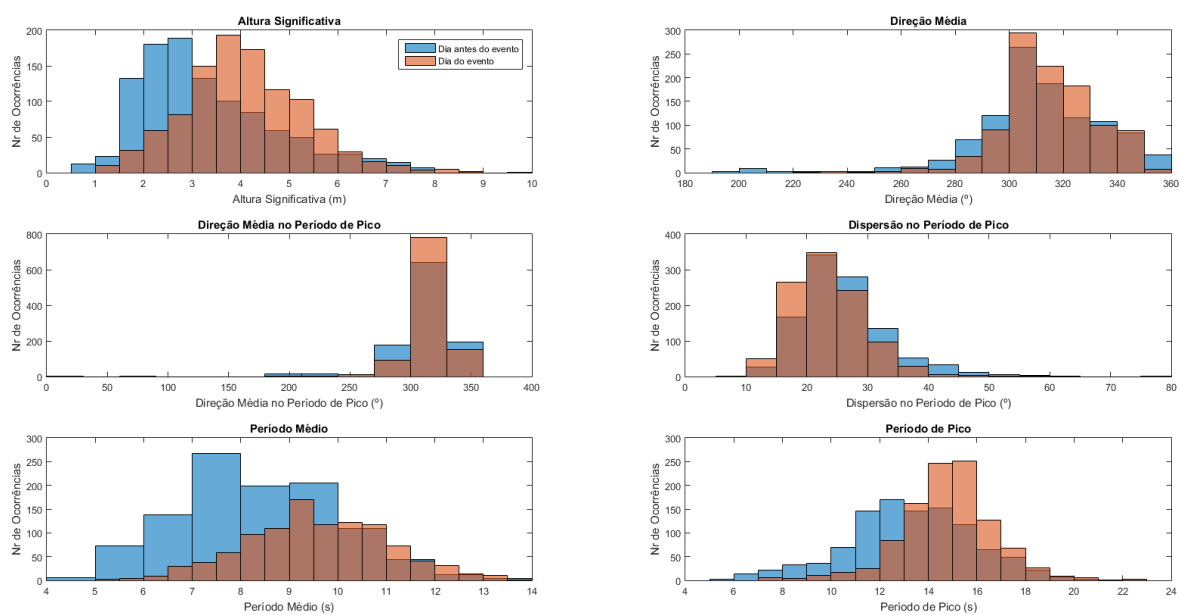


Figura 4.7: Comparação entre os valores dos parâmetros no dia anterior ao evento e no dia do evento

Começando por aplicar a condição 1 (Remoção dos dias consecutivos na matriz A), o resultado obtido está expresso na figura 4.8, em que se eliminou parte dos dados da matriz de dias anteriores, correspondente a dias de evento que estavam inseridos nesta matriz. O “ramo” que entrava pelos valores mais altos, nos dias de evento na altura significativa, período médio e período de pico, perderam agora relevância com uma frequência de ocorrência quase nula, mas ainda assim presente, no entanto, concentram-se agora numa distribuição similar aos dias de não evento para estes parâmetros. Na direção média, a janela que se falou anteriormente por ser a mais frequente para dia de evento (300°-340°), perdeu agora valores que estavam ligados aos dias anteriores ao evento, o mesmo aconteceu para a direção média no período de pico. A dispersão, começa também a perder a enorme similaridade para os dias de evento, com uma diminuição na frequência para valores que caracterizam os eventos. Retiradas as características de evento, dos dados referentes aos dias anteriores a este fenômeno, era necessário também filtrar os dados correspondente à matriz B. Após uma análise às sequências temporais, que mostram a variação dos parâmetros no dia anterior e no dia do evento (Apêndice C),

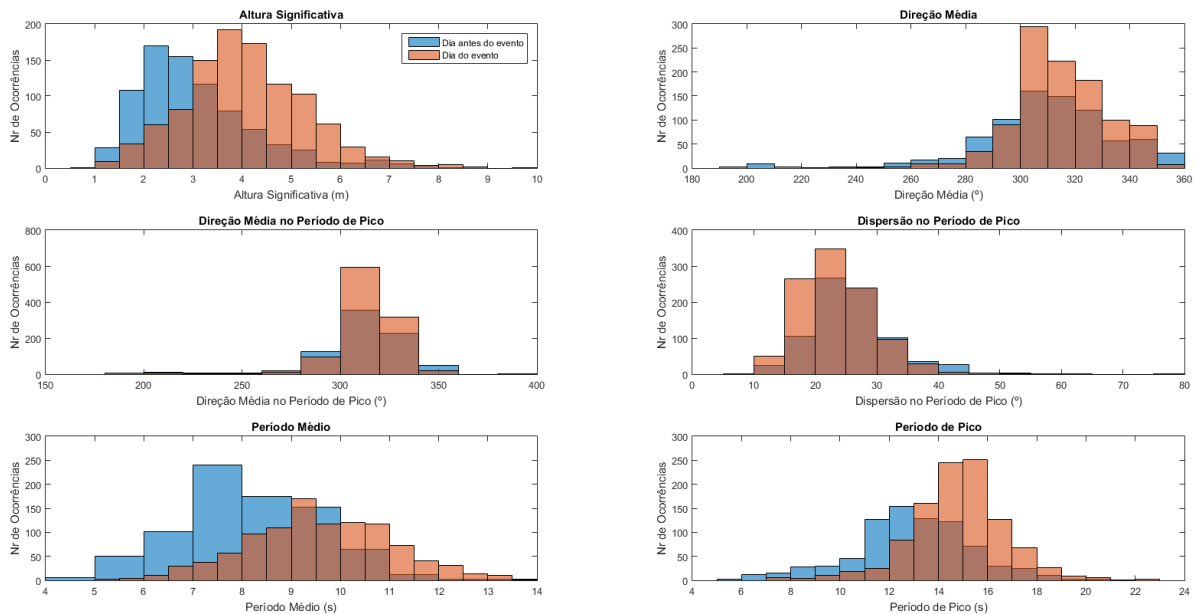


Figura 4.8: Comparação entre os valores dos parâmetros no dia anterior ao evento e no dia do evento aplicando a condição 1 (Remoção dos dias consecutivos na matriz A)

conclui-se que na maior parte dos casos o evento é precedido de um pico no período de pico, que designa a entrada de um novo sistema de ondas (*swell*). Concluído isto, aplicou-se aos dados então a condição 2 (considerar o início do evento no pico do período de pico), que vai remover dados antes deste máximo caso ocorra no dia do evento, ou apagar os valores depois deste pico até ao fim do dia na matriz A. Através de uma breve análise estatística à altura significativa, verificou-se que em dia de evento, as médias rondam os 4m com um desvio padrão de 1.26m, e um percentil25 de aproximadamente 3m, dado isto removeu-se todos os valores em que a altura significativa toma valores inferiores a 2.5m (condição 3). Sendo o comportamento do período de pico, o principal motivo pela filtragem destes dados, calculou-se também a média e desvio padrão para este parâmetro, resultando em valores de $\mu = 14.7s$ e $\sigma = 2.1s$, com estes valores aplicou-se então a condição 4 (remover todos os valores com período de pico inferior a 12s, o que à partida é apenas um reforço à variação do período de pico. A aplicação destas condições 2, 3 e 4 em reforço com a 1 podem ser analisadas na figura 4.9.

A altura significativa, fica agora sem os valores mais baixos nos dias de evento, e nos dias anteriores perde claramente preponderância nos valores mais altos, ainda que seja normal que estes existam pois como já foi aludido, pode existir eventos em dias que não estejam nesta base de dados. As direções, clarificam agora a janela específica do *swell*, que entra e leva à ocorrência destes eventos, com valores entre os 300°(NW) e os 340°(WNW), janela um pouco mais larga na direção média no período de pico (300°-350°). A dispersão é agora mais claro, que é inferior em dias de evento e que geralmente os valores rondam entre os 15° e os 30°. O período médio e período de pico, destacam-se agora muito mais claramente, com os valores em dia de evento a ocorrerem mais vezes entre os 8.5s e os 11.5s no período médio e no período de pico entre os 13.5s e os 16.5s.

É importante, ver os valores estatísticos que definem este histograma, representados na tabela 4.2. Estes valores definem as condições ideais para a ocorrência de ondas gigantes, é necessário validá-

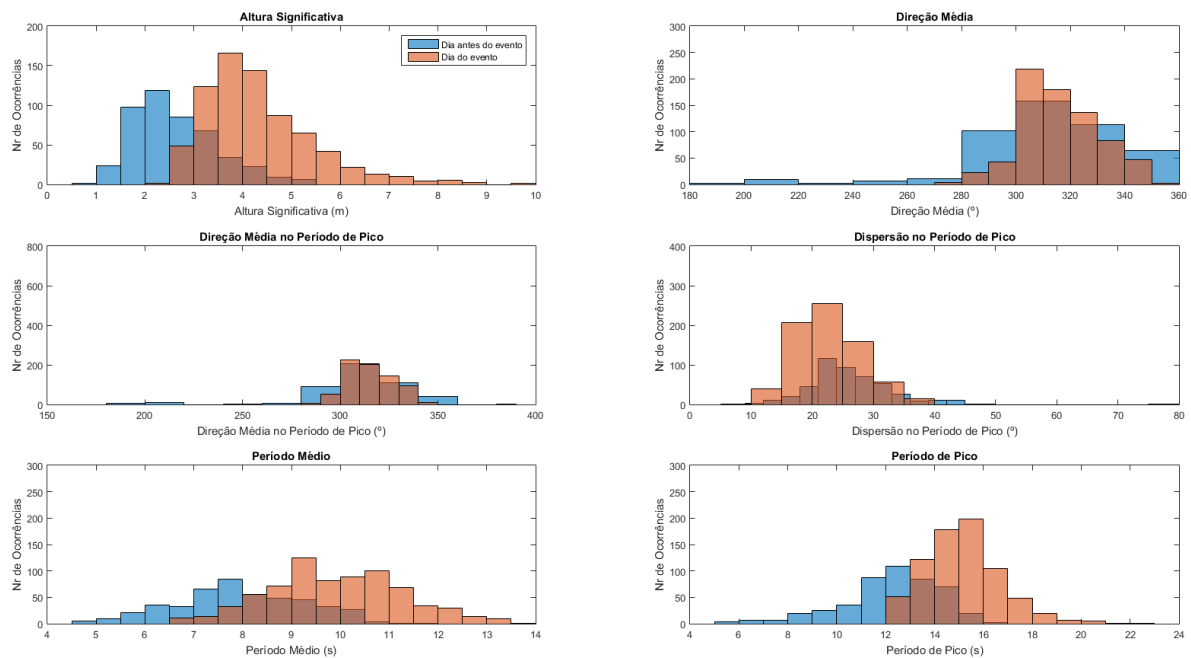


Figura 4.9: Comparação entre os valores dos parâmetros no dia anterior ao evento e no dia do evento aplicando a condição 1 (Remoção dos dias consecutivos na matriz A), 2 (Considerar o início do evento no pico do período de pico), 3 (Remoção dos valores em que a altura significativa toma valores inferiores a 2.5m) e 4 (Remoção dos valores com período de pico inferior a 12s)

los, validação essa que vai ser mostrada na próxima secção. Os parâmetros direcionais são de difícil validação, dada a proximidade com os valores de dias normais, com a janela de direções idealizada para a ocorrência de ondas gigantes, a estar inserida dentro da janela que define os dias normais. A dispersão é um parâmetro de diferente análise, porque para além de não apresentar valores que realmente caracterizem este parâmetro em dias de evento, também é difícil entender a sua relevância no ponto em que é medida, visto que parece ser mais importante já na zona de empolamento e interferência das duas frentes de onda. Este parâmetro tem uma importância mais local, como vimos na simulações do SWAN.

Os parâmetros que oferecem uma validação de melhor qualidade, são a altura significativa e o período médio, com o período de pico a desempenhar um papel importante de validar se é evento ou não, caso exista ou não exista uma variação brusca.

Dia do Evento	Média	Max	p25	p75	D. Padrão
Altura Significativa (m)	4.3	9.7	3.5	4.8	1.10
Direção Média (°)	316	-	307	326	14.0
Direção Média no Período de Pico (°)	315	-	307	326	14.6
Dispersão no Período de Pico (°)	23	-	19	26	5.7
Período Médio (s)	9.9	13.8	9.0	10.8	1.36
Período de Pico (s)	15.1	22.3	14.0	16.0	1.56

Tabela 4.2: Registos nos dias de evento.

4.3 Validação dos Valores dos Parâmetros Espetrais

Para validar os valores da tabela 4.2, recorreu-se aos testes de hipóteses, neste caso ao teste-z para os parâmetros: altura significativa, período médio e período de pico. Inicialmente, o período de pico foi retirado dos testes de hipóteses, por ter os seus valores máximos não coincidentes com os registos máximos diários de período médio e altura significativa, que apresentam tendências similares (ver Apêndice C), no entanto, o elevado peso do período de pico para caracterizar estes dias evitou que este fosse ignorado.

Quando se realizou os testes de hipóteses, aplicou-se uma das conclusões retirada das tabelas e histogramas anteriores, para haver ocorrência de eventos, a direção média do *swell* de entrada deve ser entre os 300° e os 340°, posto isto, mesmo que no teste de hipóteses o retorno seja dia de evento, caso não esteja neste intervalo é considerado não evento. Realizou-se primeiramente um teste de hipóteses para os 3 parâmetros, executando para 4 níveis de significância diferentes ($\alpha_1 = 0.01$, $\alpha_2 = 0.05$, $\alpha_3 = 0.10$ e $\alpha_4 = 0.25$), para a hipótese $H_1 \neq \mu$, ou seja, a hipótese de não evento, sendo μ a média de cada parâmetro calculada no capítulo anterior. Com o aumento do nível de significância para $H_1 \neq \mu$, esta hipótese é rejeitada menos vezes, fazendo com que sejam aceites menos dias considerados como de evento (hipótese alternativa H_0). Foram testados 1546 dias, correspondentes a todos os dias da base de dados, o resultado deste primeiro teste está representado graficamente na figura 4.10.

Já tinha sido mencionado, que as alterações na altura significativa e do período médio durante o dia, aconteciam na mesma hora e seguindo uma mesma tendência, no resultado dos teste de hipóteses, esta tendência reflete-se, com resultados muito similares para os dois parâmetros, inclusive no número de eventos catalogados aceites pelo teste.

A figura 4.10, mostra que os 3 parâmetros parecem apresentar resultados similares, com um decréscimo da aceitação da hipótese alternativa (H_0) com o aumento do nível de significância, decréscimo esperado, visto que quando se aumenta o nível de significância se encurta o espaço de “aceitação” dentro da normal que define a distribuição de probabilidades para cada parâmetro. A altura significativa, para o primeiro teste de hipóteses aceitou 95 dias de evento para α_1 , dos quais 22 estão catalogados, 60 para α_2 com 11 registos, 52 para α_3 com 10 eventos, e 34 para α_4 em que apenas 7 eventos estão inseridos. O período de pico, abrange igualmente 22 eventos dos 39 eventos em 91 aceites para α_1 , 14 em 69 para α_2 , 11 em 58 para α_3 e apenas 9 para 38 vezes que hipótese não é rejeitada para α_3 . O período médio aceita 79 dias de evento, com 21 deles a pertencerem à base de dados para α_1 , 16 em 56 para α_2 , 15 em 44 para α_3 e 9 em 27 para α_4 . Não é correto dizer para já qual dos parâmetros, é o melhor para descrever um dia de evento, isto porque os dias que não são rejeitados por H_0 , podem mesmo vir a ser um dia de evento, simplesmente não foi registado e/ou surfado. Seria expectável, que quanto mais dias aceites como eventos, maior o número de eventos registados dentro destes dias, essa tendência não é totalmente verificável, portanto não é possível descartar nenhuma das opções.

Foram analisados os eventos da base de dados, que não são detetados pelo teste de hipóteses, de referir que os valores introduzidos para testes resultam dos dias de eventos filtrados, em que são ex-

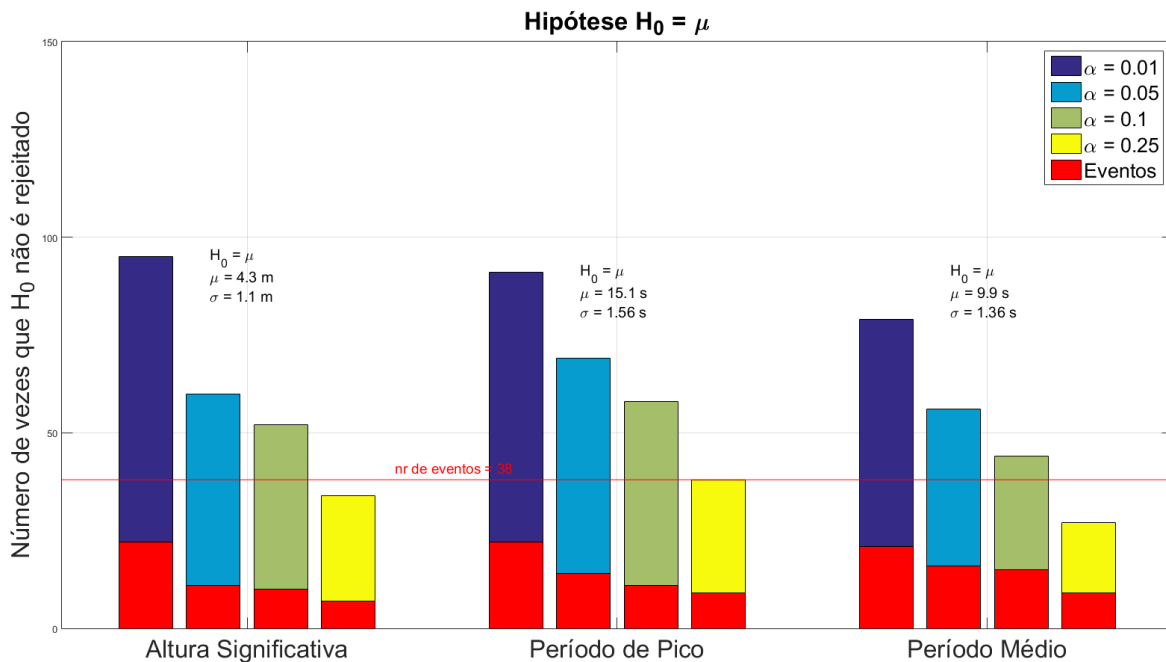


Figura 4.10: Teste de Hipóteses (Hipótese alternativa: $H_0 = \mu$) para altura significativa, período de pico e período médio para diferentes níveis de significância

cluídas as horas que teoricamente não correspondem a condições de não evento, e neste teste estão a ser consideradas as 24h de um dia. Conclui-se, que os dias de evento que não são captados por este teste, ou são eventos muito extremos que acabam por fugir muito aos valores médios, ou então, são dias com alguma inconsistência direcional ou de baixa intensidade (valores baixos de altura significativa e período médio e de pico). De forma a tentar recuperar alguns dos dias registados, realizou-se um teste de hipóteses para $H_0 > \mu$ e somaram-se, os dias que foram aceites como dias de evento (apenas são considerados dias diferentes) aos dias do primeiro teste. O resultado está expresso na figura 4.11. Com a soma do resultado dos dois testes de hipóteses, há um aumento notável dos dias de eventos aceites pelo teste de hipóteses, e há também uma proximidade maior entre os resultados para diferentes níveis de significância. Esta aproximação, entre os diferentes níveis de significância, acontece por consequência deste segundo teste, que explora o ramo de maiores valores da distribuição de probabilidades. A altura significativa ,conta agora para α_1 com um total de 134 dias aceites como evento, dos quais 27 pertencem à base de dados, 20 em 113 para α_2 , 20 em 110 para α_3 e 18 em 96 para α_4 . Este vai ser o parâmetro que apresenta mais dias como dias de evento, porque a forte agitação marítima local, pode ser definida por uma vaga forte, em conjunto com um *swell* com valores altos, que pode resultar em alturas significativas altas e períodos não tão altos.

O período médio, tem agora 27 eventos em 99 dias aceites para α_1 , 25 em 84 para α_2 , 24 em 73 para α_3 e 21 em 66 para α_4 . O período de pico apresenta resultados muito semelhantes com 27 em 102 dias considerados pelo teste para α_1 , 23 em 86 para α_2 , 20 em 77 para α_3 e 19 em 66 para α_4 .

A soma dos dois testes de hipóteses, mostra resultados interessantes nomeadamente ao número de eventos da base de dados captados. Salta à primeira vista, os resultados para α_1 em que o número de eventos catalogados aceites pelo teste de hipóteses, é o mesmo para todos os parâmetros, isto

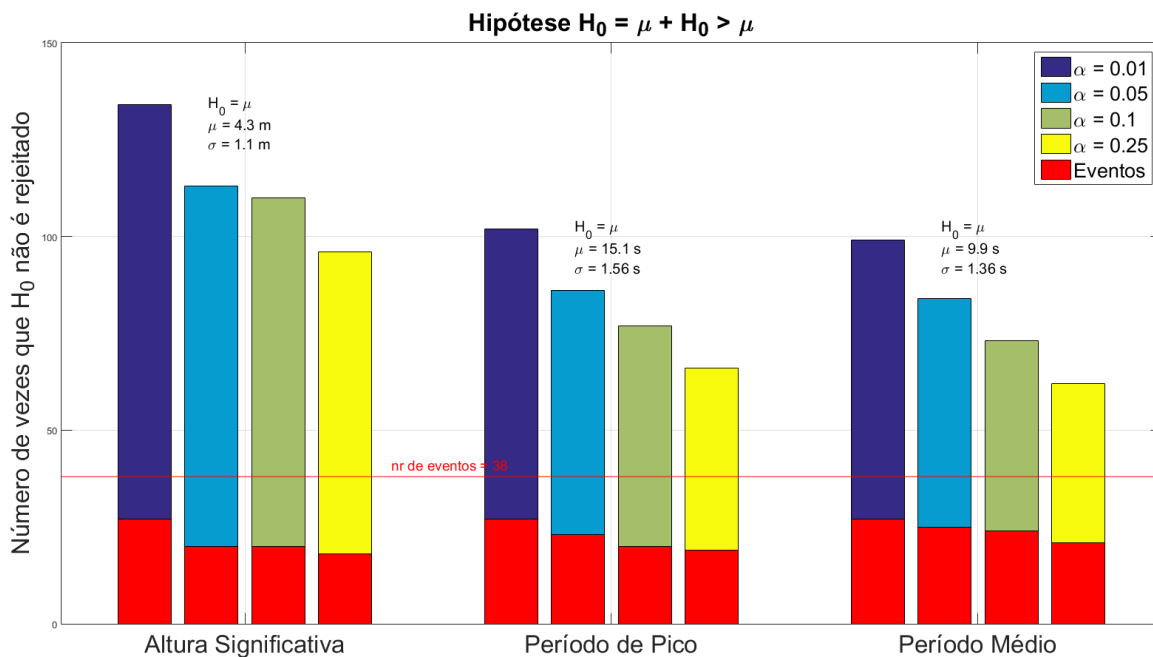


Figura 4.11: Soma dos resultados dos testes de Hipóteses para Hipótese alternativa: $H_0 = \mu$ e Hipótese alternativa: $H_0 > \mu$ para altura significativa, período de pico e período médio para diferentes níveis de significância

não quer dizer necessariamente que estes 27 eventos correspondem exatamente a 27 datas iguais, para descartar essa questão e entender se é possível relacionar algum dos parâmetros, ou se estes têm de ser sempre analisados individualmente, foi se comparar quando as datas coincidiam para os diferentes níveis de significância, figura 4.12. E como é possível ver em 4.12a, os 27 eventos captados não correspondem em nenhum dos parâmetros às mesmas datas de eventos. Destes 27 eventos, 20 correspondem à mesma data entre altura significativa e período de pico, 18 entre altura significativa e o período médio, 19 entre período médio e período de pico e apenas 13 entre os 3 parâmetros. Estes número diminuem com o aumento do nível de significância mas com os parâmetros que melhor se relacionavam a manterem essa característica, com a altura significativa a apresentar a melhor relação com o período de pico, seguido do período de pico com o período médio, e só depois a altura significativa com o período médio. Continua a ser inconclusivo para qual dos níveis significância se deve aplicar o teste de hipóteses, visto que não há uma validação dos dias de eventos aceites pelo teste.

De forma a entender, qual o comportamento dos testes de hipóteses, na aceitação dos dias como dia eventos, fez-se uma análise anual/mensal, em que os eventos catalogados aceites pelos testes, são colocados contra os eventos também considerados pelos testes de hipóteses (figura 4.13). Esta análise, foi feita para perceber se a falta de eventos catalogados nos primeiros anos, pode estar a influenciar esta diferença entre os dias aceites nos testes e os dias registados. Neste caso, vamos apenas olhar para o nível de significância α_1 , por incluir o maior número de eventos catalogados.

Algo que se verifica numa primeira impressão da figura 4.13, é o facto dos vermelhos (eventos da base de dados), aparecerem com muito mais incidência de 2015 a 2017, e com muito menos frequência nos anos anteriores. Este fator, pode estar associado ao impulsionamento da Nazaré e do surf de ondas gigantes, fazendo com que de ano para ano, consoante as condições, existam mais registos de dias

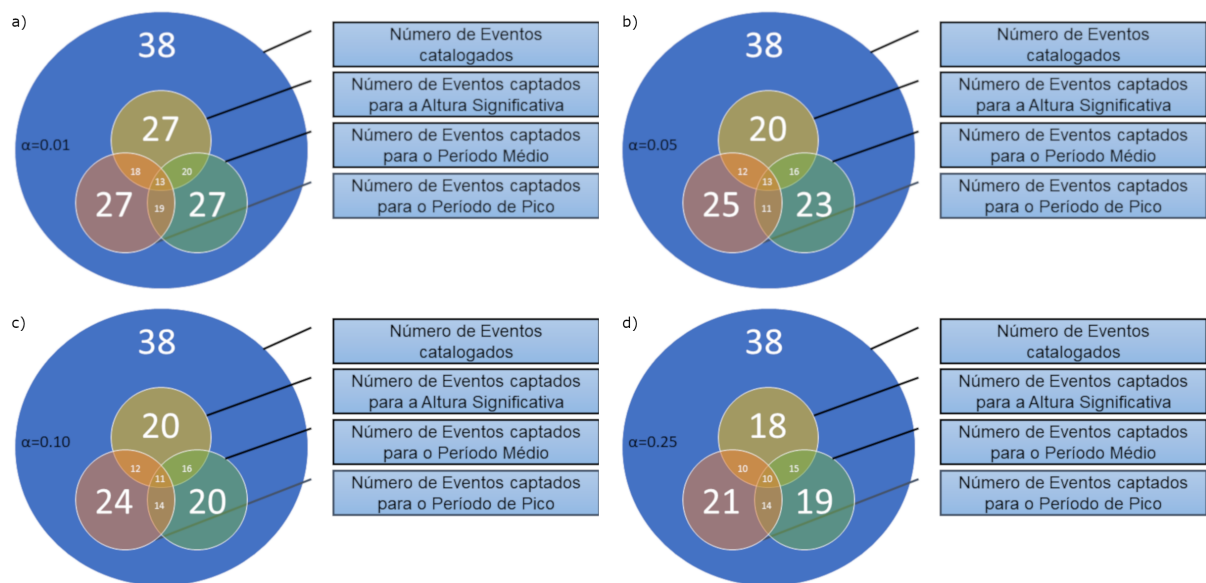


Figura 4.12: Análise aos dias de eventos catalogados capturados no teste de hipótese e à sua relação entre parâmetros para diferentes níveis de significância (α_1 a), α_2 b), α_3 c), α_4 d))

de ondas grandes. Outro tipo de abordagem, que foi feito de forma a tentar decifrar possíveis eventos que não estivessem registados, ou agitação marítima que estivesse a induzir em erro os testes, foi identificar extremos meteorológicos (condições meteorológicas pouco usuais, geralmente associadas a dias de forte vento e forte agitação marítima), que tivessem acontecido dentro deste intervalo de tempo, e tentar associar ao elevado número de eventos aceites pelo teste. Procurou-se então, nos meses em que os a hipótese dia de evento é muito aceite mas, que contemple poucos ou nenhuns eventos da base de dados, se existiu algum sistema meteorológico que impulse condições extremas junto à costa. Começando pelos primeiros anos, com Dezembro de 2012 e Janeiro de 2013, a conterem dias de extremos meteorológicos, associados ao elevado número de eventos captados pelo teste, nestes meses, para a altura significativa figura 4.13a. Também há registo destes extremos, para Janeiro 2015, Janeiro 2016 e Fevereiro 2016, onde também se verifica um elevado número de eventos aceites, mas com poucos ou nenhum evento catalogado. Pode-se constatar, que estes extremos acabam por afetar mais a altura significativa, do que o período médio e período de pico, e que o sistema meteorológico deve também ser considerado, quando se refere condições ideais para a ocorrência de ondas gigantes geradas por interferência.

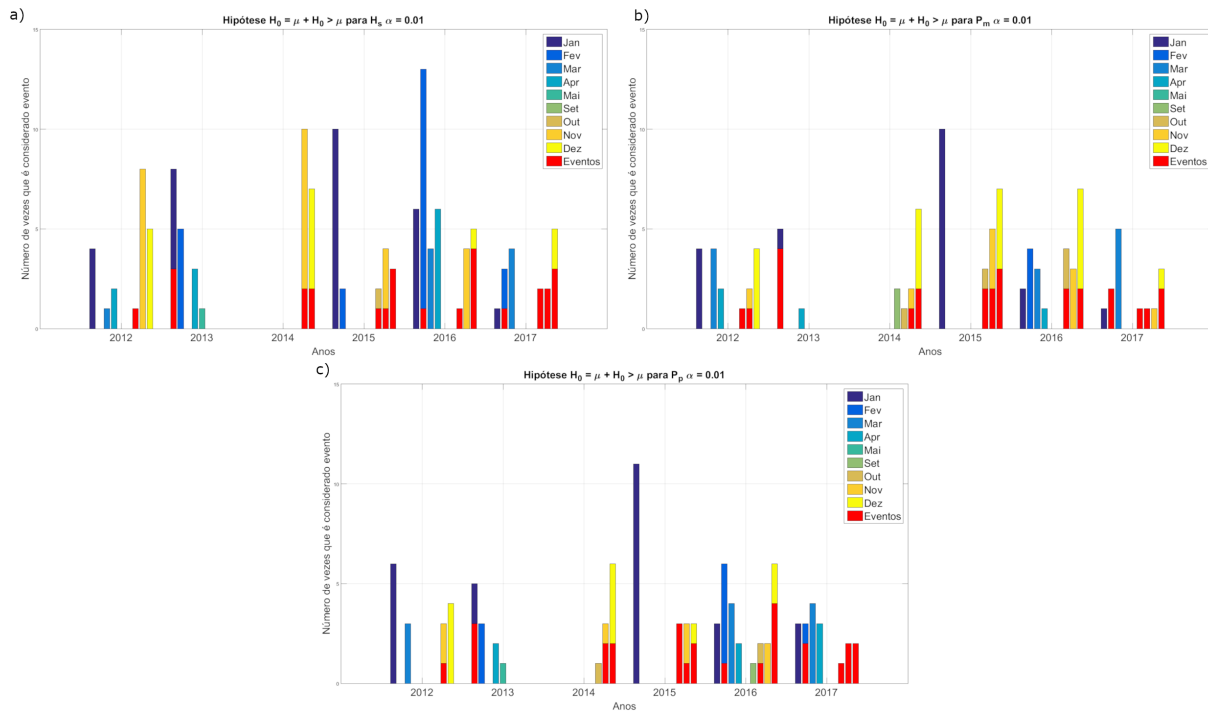


Figura 4.13: Número de eventos considerados pelos testes de hipóteses ($\alpha = 0.01$) para cada mês de 2012 a 2017 para, altura significativa a), período médio b) e período de pico c)

Como reflexão final, analisou-se a flexibilidade dos testes de hipóteses para cada parâmetro, isto porque apesar cada uma das populações ser descrita por uma média e desvio padrão próprio, a sua normal é diferente de parâmetro para parâmetro, como se viu na figura 4.14. Foi apenas feita uma análise para o nível de significância $\alpha = 0.01$, por ser o que apanha o maior número de eventos, e não haver um critério que permita concluir se estes dias são ou não são dias de ondas grandes. Analisou-se então, o valor limite para cada parâmetro, o limite para o qual o teste considera se é ou não evento, e concluiu-se que se considera evento caso:

$$\begin{aligned}
 \text{Altura Significativa} &\implies \bar{x} - (\mu - \sigma) > 0.29 \\
 \text{Período Médio} &\implies \bar{x} - (\mu - \sigma) > -1.52 \\
 \text{Período de Pico} &\implies \bar{x} - (\mu - \sigma) > -2.12
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

em que \bar{x} , é a média correspondente às 24h do dia de evento, para cada parâmetro. Estes valores (eq. 4.1), são reflexo do comportamento das normais (figura 4.14), com a altura significativa a ter uma normal descrita por um declive mais acentuado, associado à baixa gama de valores, ainda que muitos deles estejam do lado direito desta normal. O facto de os valores de evento, estarem na maioria localizados para a direita, do valor médio que descreve a normal, para altura significativa, justifica o facto da condição para este parâmetro ter um valor positivo, ainda que não muito elevado, derivado à diferente dimensão dos eventos. O período de pico e período médio, dada a sua oscilação, podendo ocorrer eventos para tanto para valores mais altos (período médio - 14s, período de pico - 20s), como para valores mais baixos (período médio - 9s, período de pico - 14s), justificam o facto da condição 4.1

entre em valores negativos para estes parâmetros.

Os eventos são caracterizados por, valores de altura significativa com um mínimo relativamente bem descrito, mas o período médio e de pico, apresentam valores mais variantes. Para a ocorrência da interferência que leva a geração de ondas gigantes, é necessário mais informações a níveis locais, principalmente o vento que vai influenciar a rebentação da onda e “misturar”, ou não, as condições que entram proveniente do *swell* com as locais, levando a um sistema que não é possível descrever neste trabalho.

Para materializar, os resultados explícitos acima, desenhou-se uma tabela (4.3), que expõe por ordem de análise, as condições para cada parâmetro, para que ocorra um dia de ondas gigantes. Se for possível prever com uma certeza elevada, os valores que vão ser medidos pela boia, se esses valores se encontrarem dentro dos intervalos estipulados na tabela 4.3, a probabilidade de ocorrência de ondas gigantes, aumenta consoante o número de parâmetros inseridos dentro das condições. Contudo, os parâmetros devem ser verificados pela ordem que estão distribuídos na tabela. Caso não exista, um sinal/variação no período de pico, dificilmente se irá obter valores de altura significativa, que aceitem a condição para este parâmetro (não impede gama de direções), a não ser que, já estivéssemos sobre a presença de um sistema, caracterizado por valores altos destes dois parâmetros, em que o sinal fosse indescritível no meio da série horária. O vento, é considerado como uma característica local, devido à pouca informação que se têm sobre a sua influência, não sabendo quais as condições ideais de vento para a geração desta onda, é necessário ainda assim considerar este parâmetro.

Podem também, existir eventos com características diferentes, às concluídas neste trabalho, como por exemplo, com uma direção média diferente, mas podem corresponder a todas as outras condições. Uma amostra de 38 torna-se muito curta para uma análise a este nível, os valores determinados irão variar com a introdução de novos eventos.

Parâmetro	Condições	Precisão
Varição Período de Pico	depende do valor	38/38 = 100%
Direção Média	[300°-340°]	33/38 ≈ 87%
Altura Significativa	$\bar{x} - (\mu - \sigma) > 0.29$	27/38 ≈ 71%
Período Médio	$\bar{x} - (\mu - \sigma) > -2.12$	27/38 ≈ 71%
Período de Pico	$\bar{x} - (\mu - \sigma) > -1.52$	27/38 ≈ 71%
Vento	característica local	-

Tabela 4.3: Parâmetros ordenados por ordem de relevância com respetivas condições.

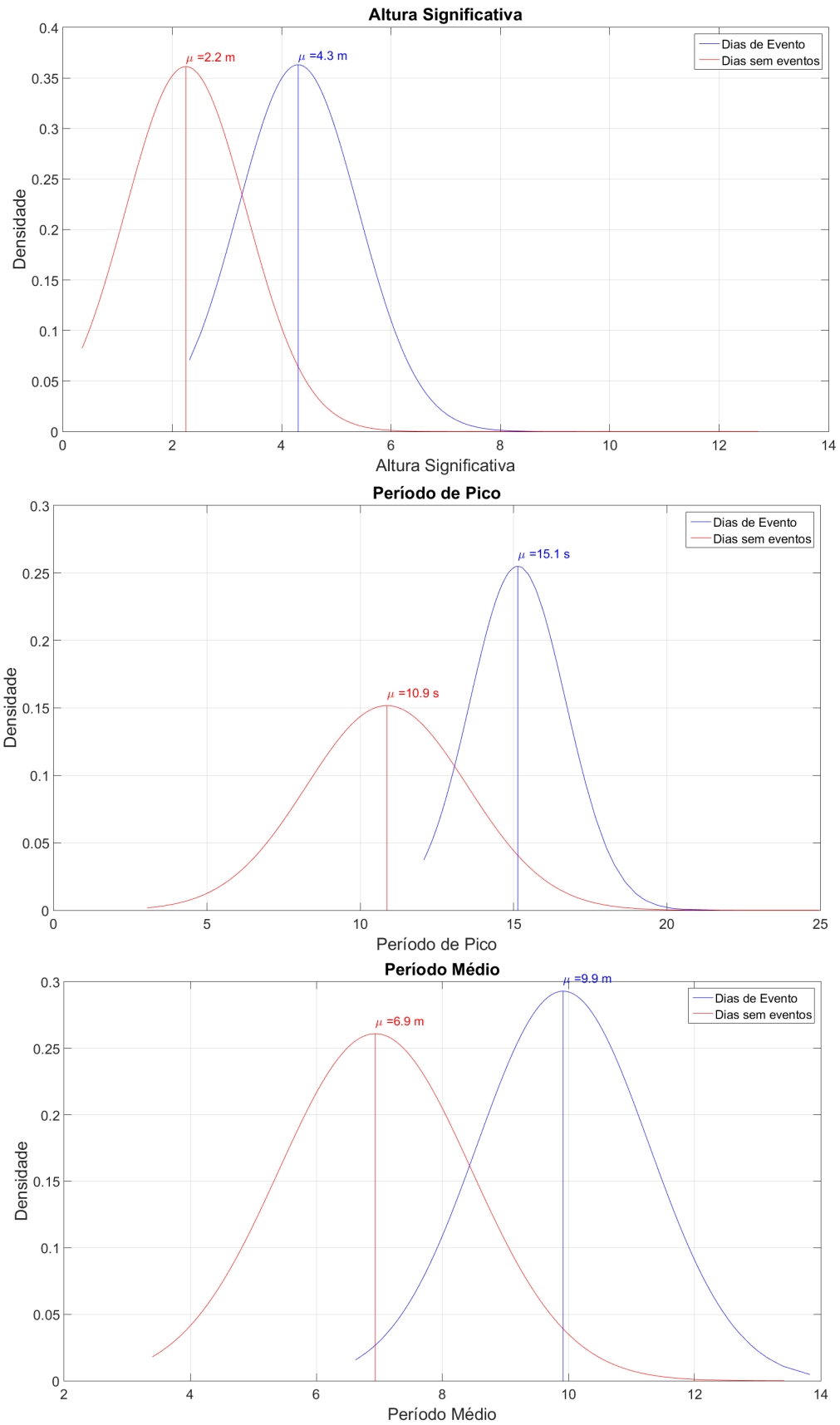


Figura 4.14: Altura Significativa, Período de Pico e Período Médio representadas como normais para dia de evento (azul) e de não evento (vermelho).

Capítulo 5

Conclusões

O estado do mar, rapidamente se pode alterar num intervalo inferior a 3h, e as suas características são de difícil descrição, quando apenas se contam com dados de uma boia ondógrafo. Apesar de existirem dados de duas, umas delas pouco acrescenta a esta dissertação. O processo que leva à geração de ondas gigantes na Nazaré, é muito detalhado e preso por pequenos pormenores, o que faz com que seja difícil, analisar o seu comportamento segundo diferentes condições. O que foi feito neste trabalho, foi tentar apenas com, informações do sistema que está a entrar a 50km da costa da Nazaré, sem informações sobre o que se está a passar mais junto à costa, tirar conclusões e restringir os parâmetros a um conjunto de valores, que sejam considerados como os ideais, para ocorrência de ondas gigantes. Tentou-se ainda estimar qual o parâmetro com o maior peso, para descrever estes eventos através de, GLM's (Generalized linear models), mas os resultados inconclusivos e com falta de ligação física, deixaram esta hipótese cair por terra. Outra das dificuldades foi mesmo catalogar os dias de evento, todos os dias registados provém de fotografias que foram retiradas durante a prática de surf, isto não quer dizer, como já foi referido várias vezes neste trabalho, que não existam outras datas, até porque a Nazaré tem ganho nome devido a este fenómeno de ano para ano. Relativamente, ao ponto de não haver informações sobre o que está a passar mais junto à costa, experimentou-se com recurso da monitorização através de câmaras, de um anterior projeto (COSMOS (Silva, 2007)), ligar os dados recolhidos pela boia a algo observável, no entanto, os dados das gravações, não coincidem com as datas dos eventos da base dados, e mesmo outros dias em que possam existir ondas gigantes, as gravações não apresentam a qualidade necessária para fazer uma descrição de qualidade, devido ao estado do tempo, estado do tempo este que vai afetar as condições locais, e neste trabalho é impossível dizer como.

O SWAN, permitiu fazer uma análise espacial sobre o processo de geração deste fenómeno, porém, a introdução de vento, levou a resultados que fogem à realidade, a dificuldade em resolver o resultado da interação de duas frentes de onda, e mesmo da variação do período de pico, acabou por limitar o uso deste modelo, e outros outputs que podiam ser analisados. O SWAN, no passo de validação através da MONICAN02, também não foi bem sucedido na grande maioria das vezes. Os valores introduzidos como inputs, caracterizando as condições fronteira, correspondente aos valores medidos na boia MO-

NICAN01, não levavam seguimento para que, quando analisados os valores no ponto correspondente à boia MONICAN02, se aproximassem dos valores medidos por essa boia.

Nesta dissertação, foi necessário tentar extrair toda a informação possível, dos dados disponíveis e retirar conclusões. A falta de dados e as características únicas do sítio, excluem para já a hipótese da formulação de uma fórmula empírica para a altura de rebentação.

Para além destas dificuldades, nem tudo foi uma nuvem repleta de incerteza, os dados e o SWAN permitiram tirar algumas conclusões. Permitiu que fosse construída, uma tabela de dados estatísticos que descrevem os dias de evento (tabela 4.2), e possibilitou o cálculo do intervalo, para o qual estes parâmetros podem variar para caracterizar um dia de evento. Todos os parâmetros, foram considerados como independentes e com o mesmo peso, ainda que a altura significativa, tenha sempre um papel de maior importância, pois é esta que descreve a dimensão do evento. O período médio e período de pico, como variam para valores similares de altura significativa, acabam por perder preponderância em relação a este parâmetro, contudo não deixam de ser extremamente importantes, e de carácter obrigatório de análise, quando se procura prever um dia de ondas gigantes. O parâmetro talvez menos importante nesta análise, será a dispersão, que se verificou através do SWAN, ter a variância espacial grande, o que faz com o que o valor de entrada perca relevância neste caso. A direção média e direção média no período de pico, são os parâmetros que permitem fazer uma análise mais assertiva, com um intervalo de direções para dia de eventos bem descrito, e com poucos casos excecionais a sair fora deste intervalo.

Antes de um valor descrito pela condição 4.1, para a altura significativa, aparece na maioria das vezes também um máximo, ou variação muito forte no período de pico, este pico descreve a entrada de um novo sistema de ondas. Foi calculada a média destas variações para os eventos registados, o valor é de 5.42s com um desvio padrão 2.45s, o que mostra a oscilação destes picos, e retira a oportunidade de referir valores fixos, dado que, o valor do período de pico pode ser elevado, levando a uma variância mais baixa, do que quando se tem valores do período de pico mais baixos. Outro fator interessante no período de pico, é o facto deste ter um máximo seguido de uma pequena quebra, e para além deste pormenor, a altura significativa e período médio, apenas se manifestam algumas horas depois dependendo da situação. Isto acontece porque, nos estamos a referir valores espectrais, o período de pico corresponde unicamente às ondas de maior energia, daí ter o seu comportamento oscilante, no caso da altura significativa, é calculada através da área do espectro, é normal que inicialmente dentro deste calculo, entrem ainda ondas com alturas mais baixas, e que o valor de altura significativa vá aumentando com o tempo.

Os testes de hipóteses, permitiram verificar que, existem outros dias em que provavelmente ocorreram ondas gigantes, para além dos que estão registados, e que cada parâmetro funciona independentemente, isto é, um dia que seja considerado como evento para o período médio, pode não o ser para altura significativa, e vice-versa. O ponto de partida, passa então por ser da altura significativa e da direção média, se as condições concluídas para os outros parâmetros se verificarem, a probabilidade de ocorrência de evento aumenta. Na realização dos testes, há também uma incerteza, qual seria a resposta caso fossem consideradas amostras entre 3 a 6 horas, os eventos em alguns dos casos, não

se prolongam por uma extensão muito grande, o que pode estar a fazer com que, eventos existentes não estejam a ser considerados. Este teste, não foi feito devido à lacuna de dados que por vezes existe, fazendo com que em 24h, existam *gaps* entre hora,s e possam levar a análises de 6h que contenham apenas 1 ou 2 horas de registo. Neste assunto, pode também entrar o facto de interessar ou não, que o evento ocorra da parte da noite ou da parte do dia, consoante o foco de um futuro estudo.

5.1 Resultados Conseguídos

Os resultados mais relevantes atingidos neste trabalho, são os valores para os quais os parâmetros se devem aproximar, para que no dia em questão, as condições estejam reunidas para a ocorrência de ondas gigantes (tabela 4.3). Esta tabela está construída por ordem de análise, não quer no entanto dizer, que caso falhem as duas primeiras condições não existam ondas gigantes, mas são casos mais raros. O parâmetro central acaba por ser a altura significativa, que descreve o estado do mar a 50km da costa, e não junto à zona de rebentação. Caso a condição, para a altura significativa falhe, é improvável a ocorrência de ondas gigantes, mas devido ao tamanho da amostra, não se pode excluir a hipótese de ocorrência.

Uma amostra de 38 eventos, torna-se muito curta para uma análise precisa a este nível, os valores determinados irão variar bastante, basta a introdução de 10 ou 20 eventos novos. Com uma base de dados mais composta, é possível alcançar valores mais precisos, e com certeza com uma precisão mais elevada.

Este estudo, necessita de consolidação a nível do número de eventos registados, para que possa proporcionar uma análise mais robusta, a nível de condições ideais para cada parâmetro, e que possam também distinguir, a importância de cada um deles. Para além deste ponto, é necessário mencionar algo que foi referido anteriormente, uma base de dados mais robusta permite também, fazer uma análise entre 3 a 6 horas, de maneira a que não se olhe a dias, mas que se olhe sim a condições, para que nessas horas as condições estejam ou não reunidas.

5.2 Trabalho futuro

Este trabalho, começou por ser apontado para a determinação de uma fórmula empírica, para a altura de rebentação de ondas, com a validação através de imagens do projeto COSMOS (Silva, 2007), acabando por não avançar devido à falta de qualidade das imagens, e correspondência com as datas dos eventos registadas, para além deste ponto a complicada batimetria da região, complica a aplicação de formulas empíricas, no entanto, gostaria de retomar este tema com um *background* mais reforçado sobre o assunto.

Seria também interessante, explorar os resultados obtidos para os eventos, que aconteceram no ano de 2018, e daqui em diante, de forma a redefinir as condições, e obter uma precisão mais elevada para cada parâmetro, e correspondente importância. A análise de evento, não como dia, mas como uma

situação, a acontecer num intervalo de horas, é algo também interessante, mas para isso também é preciso informação mais específica, sobre os eventos para além das datas em que foram retiradas as fotografias.

Existem outros parâmetros, nomeadamente as marés e as correntes, que não foram analisados neste trabalho. Já foi demonstrado por outros estudos como (Caldwell et al., 2009), que as marés tem um papel importante para a altura da onda por exemplo, e mesmo neste caso da Nazaré, é sabido que as correntes também funcionam como um fator de emolamento. Adicionando também estes parâmetros, seria interessante aprofundar o assunto, de maneira a definir um tipo de escala, ou índice, que desse informação sobre a dimensão do eventos num certo intervalo horário. Para além destas hipóteses mais “simples”, seria proveitoso fazer uma ligação entre os modelos que fazem a previsão do *swell*, que vai entrar na costa portuguesa, com os dados da boia, melhorar a precisão destes valores e mesmo entender qual o comportamento desta ondulação desde a sua formação até a aproximação à costa da Nazaré. Como formulação final, seria ainda desafiante analisar, de que maneira o vento junto à costa, influência estes eventos, na rebentação e na ocorrência da interferência.

Bibliografia

- Belo-Pereira, M., Muacho, S., and Carvalho, A. (2014). Implementation and evaluation of an operational ocean wave forecasting system along the coast of west iberia. *Journal of Operational Oceanography*, 7(2):35–44. doi:10.1080/1755876X.2014.11020157.
- Bosnic, I., Duarte, J., Taborda, R., Cascalho, J., Silva, A., and Oliveira, A. (2014). Modelling nearshore dynamics at norte beach (nazaré). In 3.^{as} *Jornadas de Engenharia Hidrográfica*.
- Caldwell, P. and Aucan, J. (2007). An emperical method for estimating surf heights from deepwater significant wave heights and peak periods in coastal zones with narrow shelves, steep bottom slopes and hight refraction. *Journal of Coastal Research*, 23(5):1237–1244. doi:10:2112/04-0397R.1.
- Caldwell, P., Vitousek, S., and Aucan, J. (2009). Frequency and duration of coinciding high surf and tides along the north shore of oahu, hawaii, 1981-2007. *Journal of Coastal Research*, 25(3):734–743. doi:10:2112/08-1004.1.
- Cunha, P. and Gouveia, M. (2015). The nazaré coast, the submarine canyon and the giant waves - a synthesis. 1(9–10):1–32.
- Duarte, J., Taborda, R., Ribeiro, M., Cascalho, J., Silva, A., and Bosnic, I. (2014). Evidences of sediment bypassing at nazaré headland revealed by a large scale sand tracer experiment. *Actas das 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, pages 289–292. ISBN 978-989-705-073-2.
- Döös, K. (2011). Numerical methods in meteorology and oceanography. Technical report, Stockholm University.
- Holthuijsen, L. H. (2017). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge, 2nd edition. ISBN:978-0-521-86028-4.
- Janssen, P. A. E. M. (1991). Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *Journal of Physical Oceanography*, 21(9–10):1631–1642. doi.org/10.1175/1520-0485.
- Martins, I., Vitorino, J., and Almeida, S. (2010). The nazaré canyon observatory (W Portugal) real-time monitoring of a large submarine canyon. IEEE.
- Massey, A. and Miller, S. (2006). *Tests of Hypotheses Using Statistics*. Brown University.

- Masson, D. G., Huvenne, V. A. I., Stigter, H. C., Arzola, R. G., and LeBas, T. P. (2011). Sedimentary processes in the middle nazaré canyon. *Deep-Sea Research II*, 58(9–10):2369–2387. doi:10.1026/j.dsr22011.04.003.
- Santos-Ferreira, A., Cabral, M., and Santos, C. (2015). The rehabilitation of north breakwater of nazaré harbor, Portugal. *Procedia Engineering*, 116:755–762. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.361.
- Serway, R. and Jewett, J. (2014). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. Physical Sciences, 9th edition. ISBN-13: 978-1-133-95405-7.
- Silva, A. (2007). Video-monitorização aplicada ao estudo da morfodinâmica de praias. Master's thesis, Universidade de Lisboa - Faculdade de Ciências.
- Silva, A., Taborda, R., Bertin, X., and Dodet, G. (2012). Seasonal to decadal variability of longshore sand transport at the northwest coast of portugal. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 138(6):464–472. doi:10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000152.
- Svendsen, I. A. (2006). *Introduction to Nearshore Hydrodynamics*. World Scientific. ISBN: 981-256-142-0.
- SWAN Team (2007). *SWAN User Manual*. Free Software Foundation. ISBN:978-0-521-86028-4.
- Taborda, R. and Silva, A. (2012). Cosmos: A lightweight coastal video monitoring system. *Computer Geosciences*, 49:248–255. doi:10.1016/j.cageo.2012.07.013.

Apêndice A

Teoria Linear para Ondas de Superfície Gravíticas

A hipótese da qual parte esta teoria é considerando uma perturbação, que faz com que um fluido transporte uma propriedade μ segundo um eixo através de um volume (Holthuijsen, 2017) como podemos ver na figura A.1

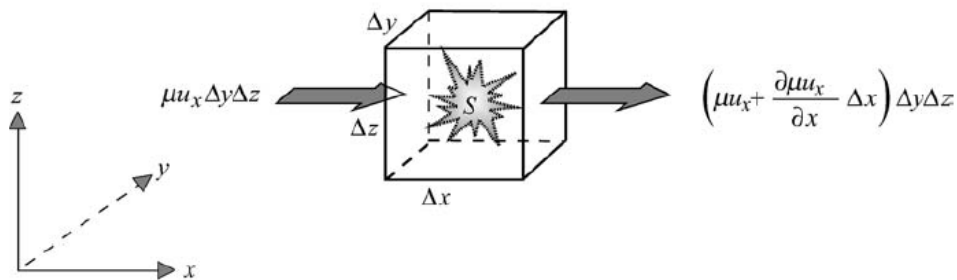


Figura A.1: Formulação da Equação de Balanço (Holthuijsen, 2017)

Neste caso estamos a referir a um corpo (fluido) num referencial x, y, z , em que o fluido transporta uma propriedade conservativa arbitrária segundo um volume $\delta x \delta y \delta z$. Na passagem sobre este volume de controlo, considera-se que a quantidade que entra é igual à que sai, não sendo isto igual para a propriedade conservativa arbitrária que neste caso vai ser a densidade (μ) (Holthuijsen, 2017). Multiplicando este balanço pelo momento linear por unidade de volume ($\mu = \rho \vec{u} = (\rho u_x, \rho u_y, \rho u_z)$), obtém-se a equação de balanço do momento:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \frac{\partial u_x(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial u_y(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial u_z(\rho u_z)}{\partial z} = F_x \quad (\text{A.1})$$

F_x é a força exercida pelo corpo na direção do eixo do x por unidade de volume. Os termos advetivos (segundo, terceiro e quarto termo) podem ser dispensados por serem de uma ordem de grandeza bastante inferior ao primeiro termo, reduzindo tudo à equação de balanço do momento linearizada (Holthuijsen, 2017):

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} = F_x \quad (\text{A.2})$$

Neste caso a força horizontal F_x é unicamente devida ao gradiente de pressão horizontal ($F_x = -\partial p/\partial x$), esta variação de pressão é devida à gravidade, termo este que entra nas conformes da teoria linear que considera a gravidade como a única força externa. Se considerarmos a densidade como constante e substituirmos esta força F na equação de balanço do momento (eq. A.1), obtemos as equações linearizadas para cada uma das direções (Holthuijsen, 2017):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial u_y}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

A equação na variante vertical contém o termo $-g$, porque o peso do volume é adicionado como uma força externa, sendo o movimento ascendente considerado como positivo, este termo aparece com o sinal negativo.

Para resolver as equações acima é necessário aplicar condições fronteira, principalmente à superfície e para o fundo. Sabe-se então que à superfície as partículas não vão descolar da superfície, isto é, a velocidade da partícula de água normal à superfície ($z=0$) é igual à velocidade da partícula à superfície (Holthuijsen, 2017):

$$u_z = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad \text{em} \quad z = 0 \quad (\text{A.4})$$

Onde η é a elevação da superfície, medida verticalmente desde $z=0$. No fundo, a condição fronteira imposta é que as partículas não penetram o fundo, como tal temos:

$$u_z = 0 \quad \text{em} \quad z = -d \quad (\text{A.5})$$

Para assegurar que a onda é apenas sujeita ao efeito da gravidade, que a pressão à superfície da água é constante (considerada como zero), temos (Holthuijsen, 2017):

$$p = 0 \quad \text{em} \quad z = 0 \quad (\text{A.6})$$

Para resolver as equações anteriores analiticamente é necessário recorrer à função velocidade potencial $\phi = \phi(x, y, z, t)$, que é definida como a função em que as derivadas espaciais são iguais às velocidades das partículas de água (Holthuijsen, 2017):

$$\phi(x, y, z, t) \quad \text{definido como} \quad u_x = \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad u_y = \frac{\partial \phi}{\partial y}, \quad u_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (\text{A.7})$$

Esta função apenas funciona para um fluido irrotacional, neste caso é possível escrever a equação da

continuidade em termos de ϕ substituindo a eq. A.7 na equação da continuidade ($\partial u_x/\partial x + \partial u_y/\partial y + \partial u_z/\partial z = 0$), esta é denominada de equação de Laplace (Holthuijsen, 2017):

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \quad (\text{A.8})$$

As condições fronteira cinemáticas à superfície e no fundo podem também ser expressadas em termos da função da velocidade potencial obtendo:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad \text{em} \quad z = 0 \quad (\text{A.9})$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{em} \quad z = -d \quad (\text{A.10})$$

As três equações linearizadas de balanço do momento (eq. A.3) podem também ser expressadas como termos de ϕ substituindo das derivadas espaciais (eq. A.7) nestas equações, obtendo para uma propagação no eixo do x (Holthuijsen, 2017):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{A.11})$$

Alterando a ordem de diferenciação e movendo os termos de um lado para o outro é possível alcançar as equações linearizadas do balanço do momento obtendo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gz \right) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gz \right) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gz \right) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

Os termos dentro dos parêntesis aparecem igualmente em todas as equações (eqs. A.12) mostrando que não são dependentes de x,y,z mas sim do tempo, se se considerar $f(t) = 0$ obtém-se a equação linearizada de Bernoulli:

$$\frac{\phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gz = 0 \quad (\text{A.13})$$

A condição fronteira dinâmica $z = \eta$ (na aproximação linear $z=0$) aplicada em termos de velocidade potencial permite-nos obter (sabendo que em $z=0$, $p=0$):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0 \quad (\text{A.14})$$

Todas as equações referidas acima estão explicitas graficamente na figura A.2. Vamos ver agora que a equação de Laplace e as condições fronteira cinemáticas serão fulcrais para encontrar a solução para

a velocidade potencial e para entender os comportamentos das ondas (Holthuijsen, 2017).

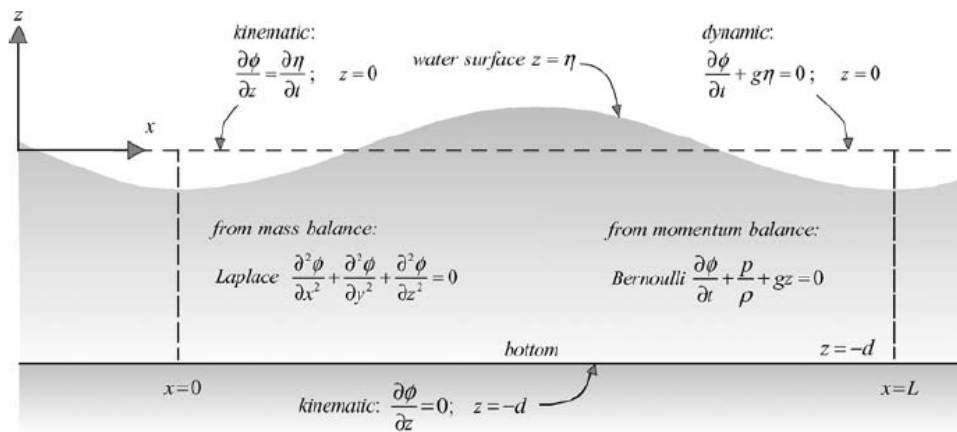


Figura A.2: Explicitação gráfica das equações resolvidas na forma de função de velocidade potencial (Holthuijsen, 2017)

Apêndice B

Função para descarregar os dados mensais das boias

```
function [date_array , hs , hmax , hm0 , mdir , sprtp , thmax , thtp , thm02 , tmm19 , tp , hse ,  
         hmaxe , mdire , thtpe , thm02e , tpe , vn , sprtpe ] = data( file , y)
```

```
%%LOAD DOS FICHEIROS DAS MONICAN E DOS EVENTOS
```

```
%%y=1 DEVOLVE OS PLOTS
```

```
data=load( file );
```

```
even=load( 'C:\Users\Diogo Sousa\Data\Eventos\Eventos.txt' );
```

```
daye=even( : , 1 );           %DIA DO EVENTO
```

```
mone=even( : , 2 );           %MES DO EVENTO
```

```
yeae=even( : , 3 );           %ANO DO EVENTO
```

```
yeae=yeae+2000;
```

```
mc= file ( 3 );               %NR DA MONICAN
```

```
year= file ( 12 );
```

```
year=str2num( year );
```

```
year=2010+year;
```

```
dec=3.03;                     %DEC MAG
```

```
days=data( : , 1 );          %DIA
```

```
hours=data( : , 2 );          %HORAS
```

```
hs=data( : , 3 );             %ALTURA SIGNIFICATIVA
```

```
hmax=data( : , 4 );           %ALTURA MAXIMA
```

```

hm0=data(:,5); %ALTURA SIGNIFICATIVA (ZERO ASCENDENTE)
mdir=data(:,6); %DIREÇÃO M DIA GLOBAL
mdir=mdir+dec;
sprtp=data(:,7); %DISPERSAO NO PERIODO DE PICO
thmax=data(:,8); %PERIODO DE ONDA MAXIMO
thtp=data(:,9); %DIREÇÃO M DIA NO PERIODO DE PICO
thm02=data(:,10); %PERODO M DIO
tmm19=data(:,11); %PERODO DE ENERGIA
tp=data(:,12); %PERODO DE PICO

```

```

for m=1:length(mdir)
    if mdir(m)<=100
        mdir(m)=mdir(m)+300;
    end
end

```

```

fday=round(days(1));
lday=round(days(end));
fhour=hours(1);
lhour=hours(end);
mm=((days(1)-fday)*100);
mm=round(mm);

```

```

start_date=datenum(year,mm,fday,fhour,00,00);
end_date=datenum(year,mm,lday,lhour,00,00);
hr_step=datenum(0,0,0,1,00,00);
date_array=(start_date:hr_step:end_date)*24*3600;

```

```

%%COMO OS FICHEIROS NAO APRESENTAM UM S RIE SEGUIDA, CRIOU-SE UM VETOR
DATENUM

```

```

%%NO QUAL TIREI OS DIAS E HORAS QUE NAO CONSTAM NA SERIE

```

```

%%PARA TIRAR OS DIAS E HORAS

```

```

for i=1:length(hours)-1

    if days(i+1)-days(i)>1
        for j=round((days(i+1)-days(i))*24+hours(i+1)-hours(i))-1:1

```

```

        date_array(i+j) = [];

    end

elseif hours(i+1)-hours(i)>1 && hours(i+1)-hours(i)>0
    for j=(hours(i+1)-hours(i)):-1:2

        date_array(i+j) = [];

    end
end

if hours(i+1)==0 && hours(i)~=23

    date_array(i+1) = [];

end
end

%%GUARDAR OS DIAS DOS EVENTOS

for jj = 1:length(daye)

    v=datenum(yeae(jj),mone(jj),daye(jj),00,00,00):hr_step:datenum(yeae(jj)
        ,mone(jj),daye(jj),23,00,00);
    s=length(v);
    vt((s*jj)-(s-1):(s*jj))=v*24*3600;

end

vn=intersect(vt, date_array);
hse = [];
hmaxe = [];
mdire = [];
thtpe = [];
thm02e = [];
tpe = [];
sprtpe = [];

```

```

for kk=1:length(date_array)
    for jj=1:length(vn)

        if isempty(vn)

            hse=[];
            hmaxe=[];
            mdire=[];
            thtpe=[];
            thm02e=[];
            tpe=[];
            sprtpe=[];

        elseif vn(jj)==date_array(kk)

            hse(jj)=hs(kk);
            hmaxe(jj)=hmax(kk);
            mdire(jj)=mdir(kk);
            thtpe(jj)=thtp(kk);
            thm02e(jj)=thm02(kk);
            tpe(jj)=tp(kk);
            sprtpe(jj)=sprtp(kk);

        end
    end
end

if y==1

f=figure;
subplot(3,2,1)
plot(date_array,hs,'k')
L=get(gca,'XLim');
NumTicks = 12;
set(gca,'XTick',linspace(L(1),L(2),NumTicks))
datetick('x','dd-mmm','keeplimits','keepticks')
xlim([date_array(1) date_array(end)])
ylim([0 15])

```

```

title('Altura Significativa (m)')
xlabel('Day')
hold on
scatter(vn,hse,'r*')

subplot(3,2,2)
plot(date_array,hmax,'k')
L=get(gca,'XLim');
NumTicks = 12;
set(gca,'XTick',linspace(L(1),L(2),NumTicks))
datetick('x','dd-mmm','keeplimits','keepticks')
xlim([date_array(1) date_array(end)])
ylim([0 20])
title('Altura M xima (m)')
xlabel('Day')
hold on
scatter(vn,hmaxe,'r*')

subplot(3,2,3)
plot(date_array,mdir,'k')
L=get(gca,'XLim');
NumTicks = 12;
set(gca,'XTick',linspace(L(1),L(2),NumTicks))
datetick('x','dd-mmm','keeplimits','keepticks')
xlim([date_array(1) date_array(end)])
ylim([200 400])
title('Dire o M dia ( )')
xlabel('Day')
hold on
scatter(vn,mdire,'r*')

subplot(3,2,4)
plot(date_array,thtp,'k')
L=get(gca,'XLim');
NumTicks = 12;
set(gca,'XTick',linspace(L(1),L(2),NumTicks))
datetick('x','dd-mmm','keeplimits','keepticks')
xlim([date_array(1) date_array(end)])
title('Dire o M dia no per odo de Pico ( )')

```

```

xlabel('Day')
hold on
scatter(vn, thtpe, 'r*')

subplot(3,2,5)
plot(date_array, thm02, 'k')
L=get(gca, 'XLim');
NumTicks = 12;
set(gca, 'XTick', linspace(L(1),L(2),NumTicks))
datetick('x', 'dd-mmm', 'keeplimits', 'keepticks')
xlim([date_array(1) date_array(end)])
title('Per odo m dio (s)')
xlabel('Day')
hold on
scatter(vn, thm02e, 'r*')

subplot(3,2,6)
plot(date_array, tp, 'k')
L=get(gca, 'XLim');
NumTicks = 12;
set(gca, 'XTick', linspace(L(1),L(2),NumTicks))
datetick('x', 'dd-mmm', 'keeplimits', 'keepticks')
xlim([date_array(1) date_array(end)])
title('Per odo de Pico (s)')
xlabel('Day')
hold on
scatter(vn, tpe, 'r*')

month=datestr(date_array(1), 'mmm yyyy');
h = supitle(['Monican0', num2str(mc), ' ', month])
set(h, 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'normal')

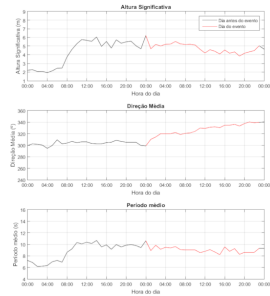
else

end

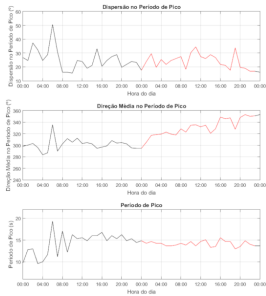
```

Apêndice C

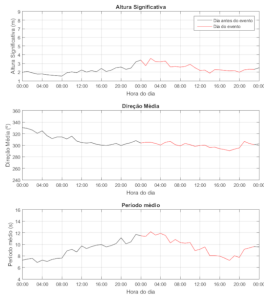
Evento de 22/10/2017



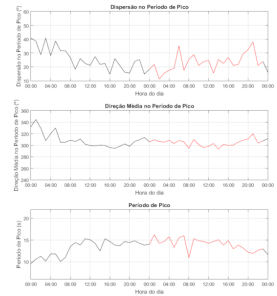
(Monican01)



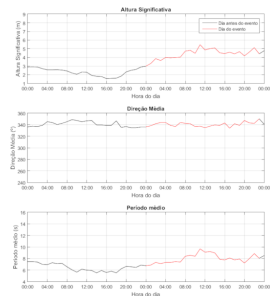
Evento de 25/10/2017



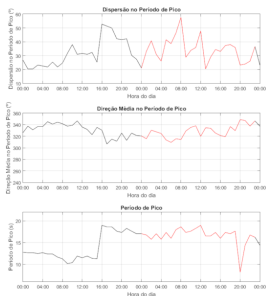
(Monican01)



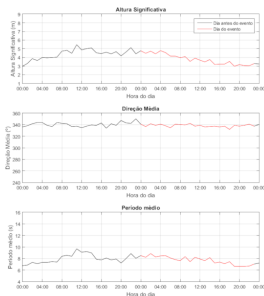
Evento de 8/11/2017



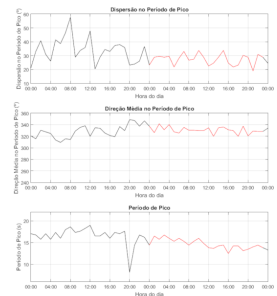
(Monican01)



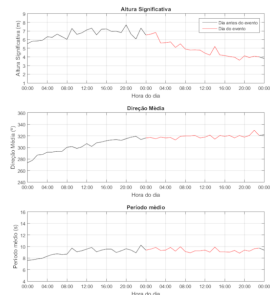
Evento de 9/11/2017



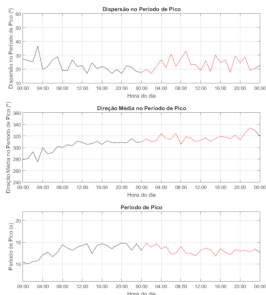
(Monican01)



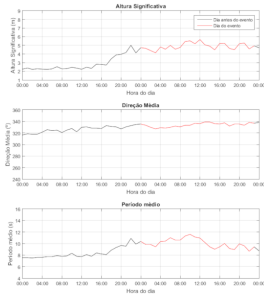
Evento de 12/12/2017



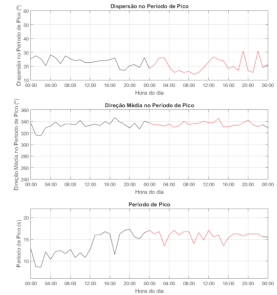
(Monican01)



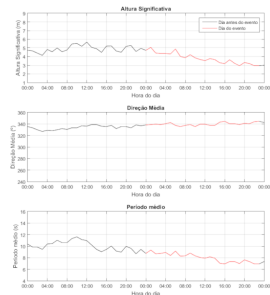
Evento de 15/12/2017



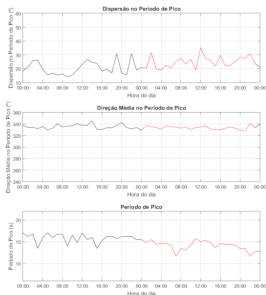
(Monican01)



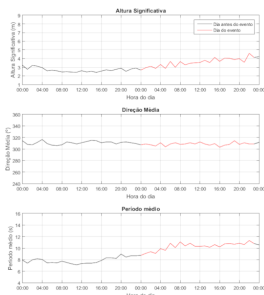
Evento de 16/12/2017



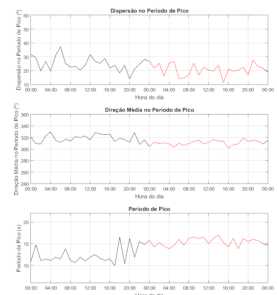
(Monican01)



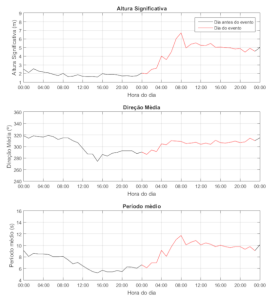
Evento de 30/12/2017



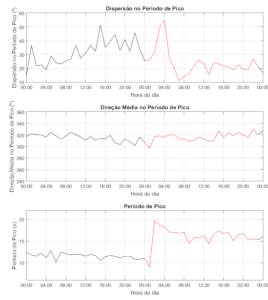
(Monican01)



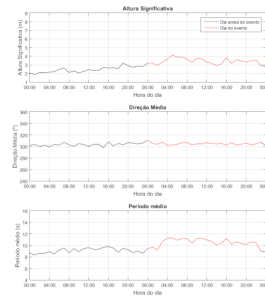
Evento de 27/10/2015



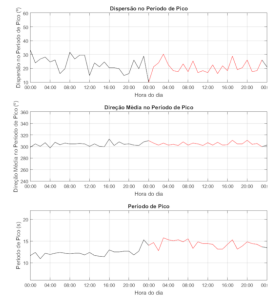
(Monican01)



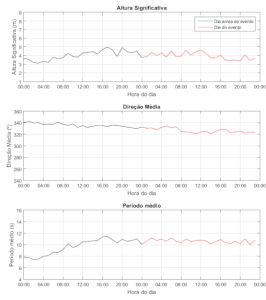
Evento de 12/11/2015



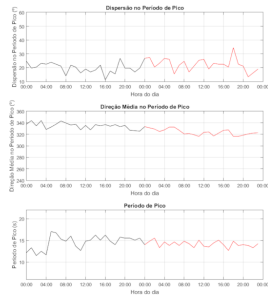
(Monican01)



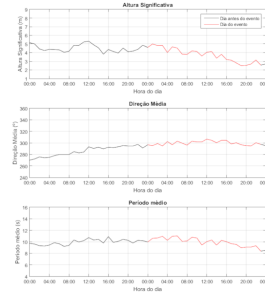
Evento de 30/11/2015



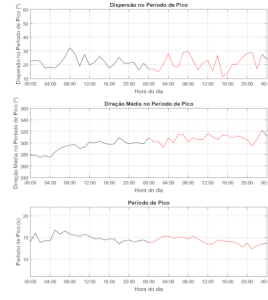
(Monican01)



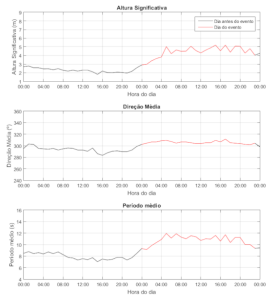
Evento de 21/12/2015



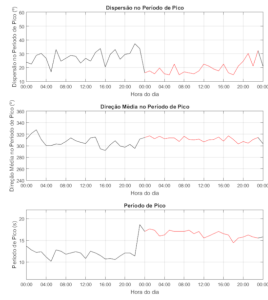
(Monican01)



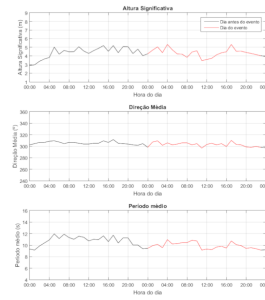
Evento de 23/12/2015



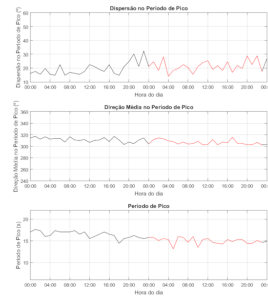
(Monican01)



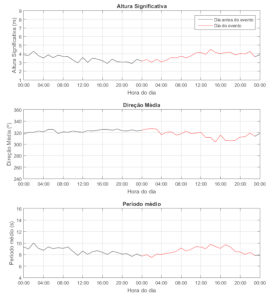
Evento de 24/12/2015



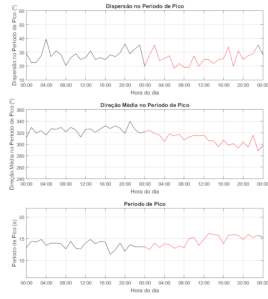
(Monican01)



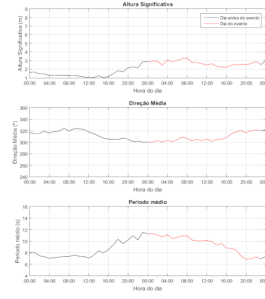
Evento de 2/2/2016



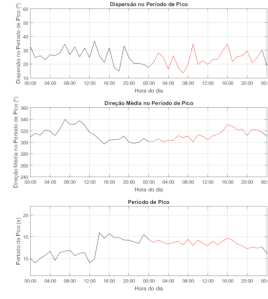
(Monican01)



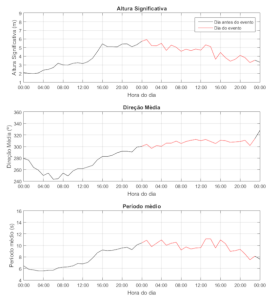
Evento de 4/10/2016



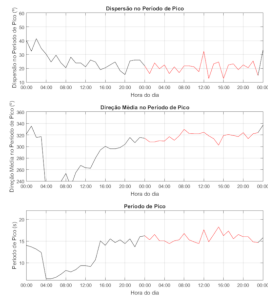
(Monican01)



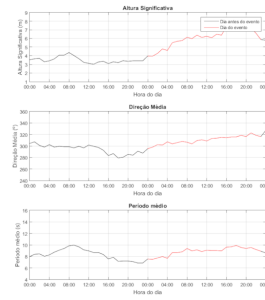
Evento de 24/10/2016



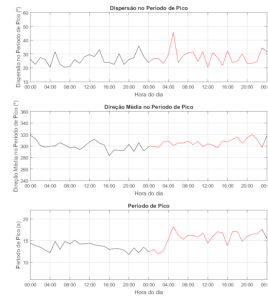
(Monican01)



Evento de 16/12/2016



(Monican01)



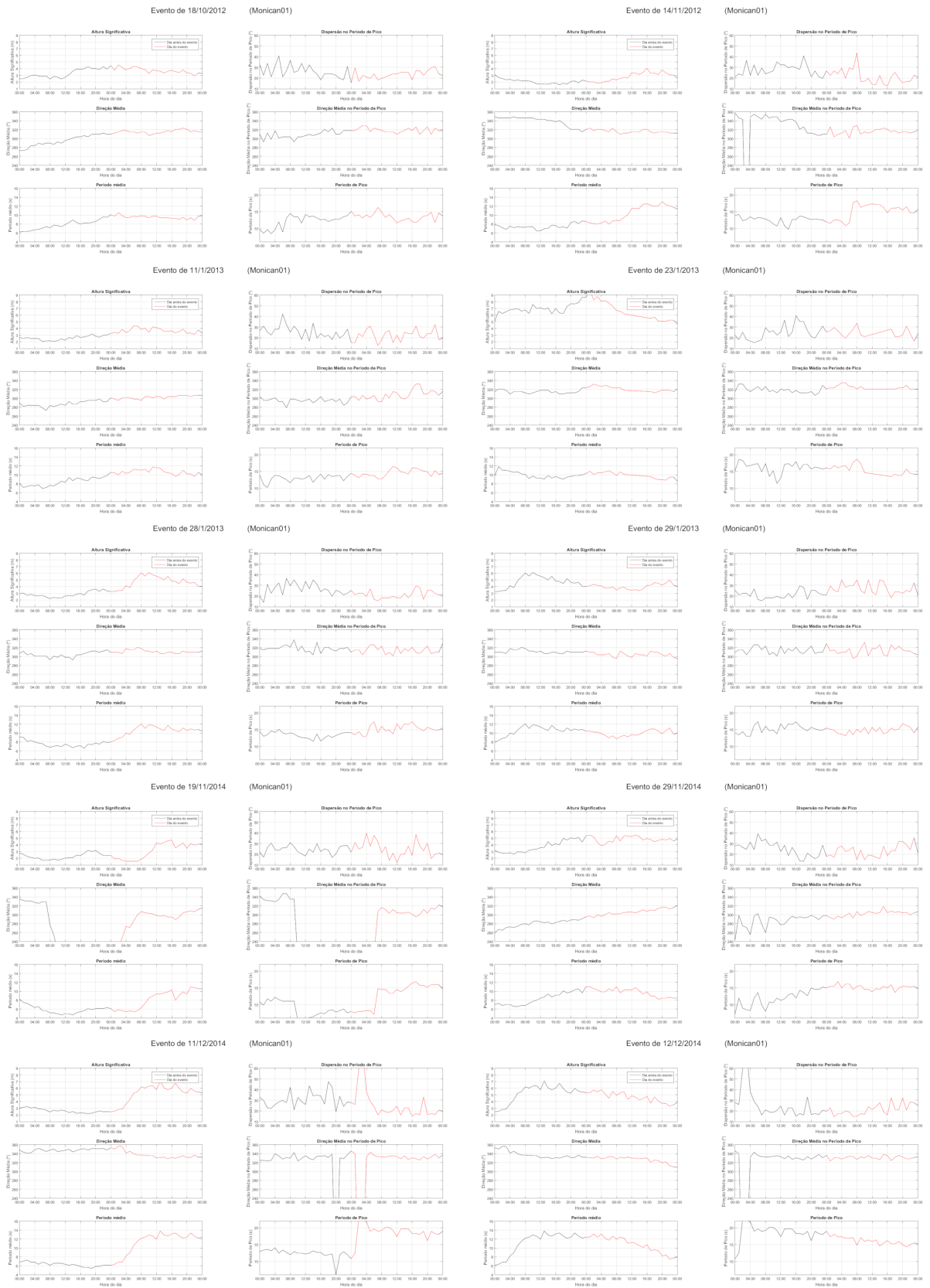


Figura C.1: Variações dos parâmetros estatísticos para o dia antes ao evento e para o dia dia do evento