



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
Universidade Técnica de Lisboa

**Aplicação do modelo SWAN na caracterização da  
agitação marítima na zona adjacente a  
Pinheiro da Cruz**

**Maria João Rodrigues Teles Sampaio**

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em  
**Engenharia Civil**

**Júri**

Presidente: Professor Doutor António Pinheiro

Orientador: Professor Doutor António Pires Silva

Co-Orientadora: Doutora Conceição Juana Fortes

Vogal: Professor Doutor António Alexandre Trigo Teixeira

**Julho de 2008**

## **AGRADECIMENTOS**

Professor Pires Silva pela paciência, apoio e precioso conhecimento que me transmitiu.

Engenheira Juana Fortes pela disponibilidade e pelo apoio permanente.

Engenheira Mariana Bernardino pelos conselhos e disponibilidade.

Engenheira Liliana Pinheiro por toda a ajuda com o SOPRO.

Muito obrigada a todos os amigos e amigas que sempre me apoiaram e me acompanharam em todo este percurso escolar.

Ao Manel pela paciência, apoio e ajuda preciosos para a conclusão desta dissertação.

Ao meu pai, mãe, maninho e restante família por tornarem tudo muito mais simples!

## RESUMO

A presente dissertação teve como objectivo a aplicação e análise do desempenho do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima na zona adjacente a Pinheiro da Cruz em regime não estacionário. Esta característica é conferida por um forçamento associado a um campo de ventos à superfície variável.

O trabalho realizado foi dividido, essencialmente, em três partes.

Uma primeira parte onde se efectuou uma pesquisa bibliográfica intensiva de modo a compreender melhor o tema. Analisou-se a estrutura dos ficheiros de dados e de resultados do modelo SWAN. Foram também realizadas modificações no programa SOPRO que visaram o alargamento da aplicabilidade do programa, em particular a capacidade de operar em regime não estacionário.

Seguidamente, procedeu-se a um conjunto de teste de sensibilidade que ajudaram na definição quer das características dos dados a fornecer ao modelo quer das condições de cálculo e de fronteira do modelo.

Finalmente, aplicou-se o modelo SWAN na zona marítima adjacente a Pinheiro da Cruz. Foram tidas em conta duas situações de diferentes condições de agitação marítima e ventos: em Janeiro de 2001 no período de 24 a 25, e em Fevereiro de 2001 nos dias 6 a 7. Os resultados do SWAN foram comparados com o ADCP ao nível de parâmetros integrais e de espectros direccionais.

As estatísticas de avaliação mostraram, especialmente o SI, que o SWAN em modo não estacionário simula as condições de mar junto à costa com uma precisão que está de acordo com os valores típicos para este tipo de modelos.

Palavras Chave: Simulação da agitação marítima; Modelo SWAN; Regime não estacionário; Espectros direccionais; Modelos espectrais de média em fase.

## ABSTRACT

The main goal of this thesis was to apply the SWAN model in a non stationary mode to the Pinheiro da Cruz area. A variable surface wind field was used to force the model, along with time dependent boundary conditions.

The study was characterized by three tasks.

To get a broad overview of the wave modeling subject a comprehensive bibliographic search was carried out as the first step. The pre and post processing modules of the SWAN were analyzed as well. Also the SOPRO application capabilities were enhanced, specially the non stationary option (absent till now).

Next, a number of sensitivity analysis helped to define the input data and the settings of the model.

Finally, the SWAN model was applied for two periods in January and February 2001. Its simulations were compared with estimates from ADCP measurements, both integral parameters and spectra.

The comparison showed, through the statistical parameters, that the SWAN model, operating in a non stationary mode, is able to simulate nearshore wind-generated waves, exhibiting an accuracy that is within the typical range of values for this kind of models.

Keywords: Simulation of wind generated waves; SWAN model; Non-stationary mode; directional spectra; phase average spectral models.

# ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.2	OBJECTIVOS E METODOLOGIA.....	2
1.3	ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	3
2.	A ONDA GERADA PELO VENTO.....	4
2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	4
2.2	TEORIA LINEAR DA ONDA – BREVE INTRODUÇÃO.....	4
2.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA E ESPECTRAL.....	6
3.	MODELAÇÃO DA ONDA EM ZONAS COSTEIRAS – MODELO SWAN.....	12
3.1	INTRODUÇÃO.....	12
3.2	ESTRUTURA MATEMÁTICA DO MODELO.....	13
3.2.1	EQUAÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA.....	13
3.2.2	OS TERMOS DE PROPAGAÇÃO.....	14
3.2.3	FORÇAMENTO PELO CAMPO DE VENTOS.....	15
3.2.4	INTERACÇÃO NÃO LINEAR DAS ONDAS.....	16
3.2.5	REBENTAÇÃO PARCIAL (“WHITECAPPING”).....	18
3.2.6	ATRITO DE FUNDO.....	18
3.2.7	REBENTAÇÃO INDUZIDA PELO FUNDO.....	19
3.3	IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA.....	20
3.3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	20
3.3.2	PROPAGAÇÃO NO ESPAÇO GEOGRÁFICO E ESPECTRAL.....	21
3.3.3	GERAÇÃO, DISSIPACÃO E INTERACÇÕES NÃO LINEARES ONDA - ONDA.....	23
3.4	PROCEDIMENTOS DE PRÉ E PÓS PROCESSAMENTO.....	24
4.	CASO DE ESTUDO – PINHEIRO DA CRUZ.....	28
4.1	ENQUADRAMENTO.....	28
4.2	DADOS DISPONÍVEIS.....	30
4.2.1	AGITAÇÃO MARÍTIMA.....	30
4.2.2	CAMPO DE VENTOS.....	32
4.2.3	MEDIÇÕES EFECTUADAS NA PRAIA DE PINHEIRO DA CRUZ.....	33
4.3	CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO DO MODELO SWAN.....	34
4.3.1	DOMÍNIO DE CÁLCULO.....	34
4.3.2	CONDIÇÕES DE FRONTEIRA.....	36
4.3.3	CARACTERÍSTICAS DAS SIMULAÇÕES.....	37
4.4	COMPARAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	40
4.4.1	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS.....	40
4.4.2	SIMULAÇÕES PARA O ACOPLAMENTO DO TIPO 1.....	40
4.4.3	SIMULAÇÕES PARA O ACOPLAMENTO DO TIPO 2.....	48

5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	53
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54
7.	ANEXOS .....	56
	ANEXO A .....	56
	ANEXO B .....	58
	ANEXO C .....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Observação da elevação da superfície livre e respectivos espectros de amplitude e fase. Holthuijsen, 2007.....	7
Figura 2 - Representação gráfica da propagação de várias ondas casuais com diferentes características. Holthuijsen, 2007.....	8
Figura 3 - Representação gráfica de um espectro bidimensional e de um espectro unidimensional. Holthuijsen, 2007.....	9
Figura 4 - Cruzamento de zeros ascendentes da elevação da superfície marítima pelo nível $\eta$ correspondentes $T_\eta$ . Holthuijsen, 2007.....	10
Figura 5 - Comparação entre os espectros de JONSWAP e Pierson-Moskowitz. CEM.....	11
Figura 6 - Representação do efeito, no espectro, do termo fonte relativo ao forçamento de um campo de ventos. Holthuijsen 2007. ....	16
Figura 7 - Representação do efeito das interacções não lineares a quatro ondas no espectro de variância. Holthuijsen 2007.....	17
Figura 8 - Representação do efeito das interacções não lineares a três ondas no espectro de variância. Holthuijsen 2007.....	17
Figura 9 - Representação do efeito da rebentação parcial no espectro de variância. Holthuijsen 2007.....	18
Figura 10 - Representação do efeito do atrito de fundo, em águas pouco profundas, no espectro de variância. Holthuijsen 2007.....	19
Figura 11 - Representação do efeito da rebentação induzida pelo fundo no espectro de variância. Holthuijsen 2007. ....	20
Figura 12 - Solução utilizada no modelo SWAN para propagação da energia das ondas no espaço geográfico, nos quatro quadrantes. Holthuijsen 2007 .....	22
Figura 13 - Regiões afectadas pelas condições de fronteira no domínio computacional a sombreado. SWAN Team (2008).....	25
Figura 14 - Coordenadas $x_{pc}$ e $y_{pc}$ correspondentes à origem do domínio de cálculo, relativamente ao “sistema local de coordenadas”. Adaptação de imagem de SWAN Team (2008). ....	27
Figura 15 - Batimetria da zona adjacente à praia da Raposa e respectiva localização.....	28
Figura 16 - Localização dos pontos de saída do WAM. Foto NASA adaptada. ....	30
Figura 17 - Localização do ADCP ( ). ....	33
Figura 18 - Dados da altura significativa ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ) e direcção média para a frequência de pico ( $D_p$ ) estimados pelo ADCP para os períodos em análise. ....	34

Figura 19 - Domínios computacionais do tipo 1 da zona adjacente a Pinheiro da Cruz. Foto NASA adaptada.....	35
Figura 20 - Domínios computacionais do tipo 2 da zona adjacente a Pinheiro da Cruz. Foto NASA adaptada.....	36
Figura 21 - Comparação entre os dados observados no ADCP e os resultados obtidos no SWAN para as duas resoluções do campo de ventos para o episódio de Janeiro. ....	41
Figura 22 - Campo de variação de Hs com respectiva escala e vectores que mostram a direcção da ondulação para 24/01/01 às 18 UTC (à esquerda) e para 25/01/01 às 12 UTC (à direita). ....	42
Figura 23 - Comparação do espectro direccionado de variância entre o obtido pelo ADCP (em cima) e pelo SWAN (em baixo) para 24/01/01 às 18 UTC.....	43
Figura 24 - Comparação do espectro direccionado de variância entre o obtido pelo ADCP (em cima) e pelo SWAN (em baixo) para 25/01/01 às 12 UTC.....	44
Figura 25 - Comparação da altura significativa, para o período do mês de Janeiro, entre os valores medidos pelo ADCP e os valores calculados pelo SWAN. ....	45
Figura 26 - Comparação do espectro direccionado de variância entre o obtido pelo ADCP (em cima) e pelo SWAN (em baixo) para 6/02/01 às 18 UTC.....	46
Figura 27 - Comparação do espectro direccionado de variância entre o obtido pelo ADCP (em cima) e pelo SWAN (em baixo) para 7/02/01 às 12UTC.....	47
Figura 28 - Comparação da altura significativa, para o período do mês de Fevereiro, entre os valores medidos pelo ADCP e os valores calculados pelo SWAN. ....	48
Figura 29 - Espectro direccionado de variância, para 24/01/01 às 18 UTC, medido pelo ADCP.	49
Figura 30 - Espectro direccionado de variância, para 24/01/01 às 18 UTC, com forçamento do ficheiro constituído por espectro direccionado de variância. ....	50
Figura 31 - Espectro direccionado de variância, para 24/01/01 às 18 UTC, com forçamento do ficheiro constituído por parâmetros integrais. ....	50
Figura 32 - Espectro direccionado de variância, para 25/01/01 às 12 UTC, medido pelo ADCP .	51
Figura 33 - Espectro direccionado de variância, para 25/01/01 às 12 UTC, com forçamento do ficheiro constituído por espectro direccionado de variância. ....	51
Figura 34 - Espectro direccionado de variância, para 25/01/01 às 12 UTC, com forçamento do ficheiro constituído por parâmetros integrais. ....	52



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Importância dos diferentes processos que afectam a evolução das ondas em águas profundas, intermédias e pouco profundas. Adaptação do quadro descrito em Battjes (1994). .	12
Tabela 2 - Valores utilizados para o forçamento da fronteira Oeste do domínio no ponto 38°N 10°W, nos dias 24 e 25 de Janeiro de 2001 .....	32
Tabela 3 - Valores utilizados para o forçamento da fronteira Oeste do domínio no ponto.....	32
Tabela 4 - Valores utilizados para o forçamento da fronteira Oeste do domínio no ponto 38°15'N 9°15'W nos dias 24 e 25 de Janeiro de 2001 .....	32
Tabela 5 Dimensão e resolução de cada domínio computacional definido.....	36
Tabela 6 - Valores utilizados para o forçamento da fronteira Oeste do domínio, nos dias 24 e 25 de Janeiro de 2001.....	37
Tabela 7 - Valores utilizados para o forçamento da fronteira Oeste do domínio, nos dias 6 e 7 de Fevereiro de 2001.....	37
Tabela 8 - Valores utilizados para o forçamento da fronteira Oeste do domínio no ponto 38°15'N 9°15'W nos dias 24 e 25 de Janeiro de 2001 .....	37
Tabela 9 - Fenómenos físicos impostos para cada domínio computacional .....	39
Tabela 10 - Resumo das simulações realizadas na aplicação do SWAN, para o período de Janeiro, para o acoplamento do tipo 1.....	39
Tabela 11 - Resumo das simulações realizadas na aplicação do SWAN, para o período de Fevereiro, para o acoplamento do tipo 1.....	39
Tabela 12 - Simulações realizadas, para Janeiro, para o acoplamento do tipo 2.....	39
Tabela 13 - Estatísticas comparativas dos parâmetros de agitação marítima, para o episódio de 24 e 25 de Janeiro, para o acoplamento do tipo 1. ....	40
Tabela 14 - Tempo de cálculo dispendido para cada uma das simulações. ....	42
Tabela 15 - Estatísticas comparativas dos parâmetros de agitação marítima, para o episódio de 6 e 7 de Fevereiro, para o acoplamento do tipo 1.....	45
Tabela 16 - Estatísticas comparativas dos parâmetros de agitação marítima, para o episódio de 24 e 25 de Janeiro, para o acoplamento do tipo 2. ....	49

## LISTA DE SÍMBOLOS

$c$  - celeridade da onda

$c_{\theta}$  - velocidade de propagação no domínio da direcção

$c_{\sigma}$  - velocidade de propagação no domínio da frequência

$C_D$  - coeficiente de arrastamento

$C_b$  - coeficiente do termo de atrito de fundo

$D_{tot}$  - taxa média de dissipação da energia da onda

$D(\theta)$  - distribuição direccional

$E(\sigma, \theta)$  - espectro direccional de variância

$E(\sigma)$  - espectro unidireccional

$f_p$  - frequência de pico espectral

$h$  - profundidade relativamente ao nível de cota zero

$H$  - altura de onda

$H_{rms}$  - altura média quadrática da onda

$H_s, H_{1/3}$  - altura significativa estimada no domínio do tempo

$H_{m_0}$  - altura significativa estimada no domínio espectral

$k$  - módulo do vector número de onda  $\vec{k}$

$L$  - comprimento de onda

$m$  - deslocamento na perpendicular

$m_n$  - momento espectral de ordem  $n$

$N(\sigma, \theta)$  - densidade de acção espectral

$t$  - tempo

$T$  - período de onda

$T_\eta$  - período de cruzamento de nível (Figura 4). Com  $\eta=0$ ,  $T_\eta$  é o período de cruzamento de zeros ascendentes

$T_{m_0}$  - período médio definido com os momentos espectrais  $m_0$  e  $m_1$

$T_{m_02}$  - período médio de cruzamento de zero ascendente

$s$  - deslocamento na direcção de propagação

$S(\sigma, \theta)$  - termos fonte e sumidouros na equação de balanço espectral

$U_{10}$  - valor de velocidade do vento a 10m de elevação

$u_*$  - velocidade de atrito

$\bar{u}$  - velocidade da corrente

$\alpha$  - constante de Philips

$\gamma$  - parâmetro de elevação do pico

$\eta$  - cota da superfície livre

$\theta$  - direcção

$\mu, \nu$  - parâmetros utilizados para a definição do método numérico

$\sigma$  - frequência intrínseca

$\sigma_\theta$  - dispersão

$\Gamma$  - coeficiente dependente da declividade da onda

$\phi(x, y, z, t)$  - potencial de velocidades

$\omega$  - frequência absoluta

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A capacidade de descrever com precisão a geração e transformação das ondas desde o largo até à zona costeira revela-se de interesse primordial para a compreensão dos processos existentes na costa.

O engenheiro portuário ou especialista em engenharia costeira tem que lidar com vários tipos de ondas, com diferentes formas de geração.

As ondas geradas pelo vento assumem um papel de extrema importância, já que, este tipo de perturbação da superfície livre do mar está associada aos fenómenos mais energéticos e potencialmente mais graves que se manifestam nesta superfície, sendo, por isso, a onda eólica o objecto de estudo pelo qual o engenheiro manifesta um maior interesse.

A constante interacção entre o mar e a costa tem um impacto económico e ambiental muito significativo. De modo a alcançar uma gestão segura e eficaz do planeamento da orla costeira é imprescindível o conhecimento da agitação marítima. Com efeito, o projecto, construção e manutenção de portos, estruturas de protecção costeira e zonas de abrigo, o dimensionamento de dispositivos de energia das ondas, quer ao largo quer na costa e a compreensão da morfodinâmica litoral (erosão de dunas e praias) são exemplos de aplicações práticas onde a necessidade do conhecimento das características de agitação marítima na zona costeira é fundamental.

Os modelos numéricos de geração e propagação das ondas têm-se apresentado como uma excelente alternativa para a determinação das características da agitação marítima em regiões costeiras. São, deste modo, utilizados para modelar a geração de ondas pelo vento e transformação das suas características (altura, direcção e período) do largo ou de um local na costa até ao local de interesse de estudo.

Um dos modelos mais utilizados na geração e previsão da agitação marítima é o modelo **SWAN** (Simulating **WA**ves **Near**shore), (Booij et al, 1999), que permite o cálculo da evolução do espectro direccional desde a zona de geração até à zona costeira, obtendo-se os parâmetros da ondulação característicos dos locais de interesse.

O modelo **SWAN** é um modelo não linear espectral, baseado na equação para a conservação da acção da onda, que permite a geração de ondas por vento e efectua a sua propagação considerando vários fenómenos intervenientes na propagação de ondas – refacção, rebentação, difracção (de forma aproximada), geração de harmónicas (interacção não linear entre ondas) – sendo considerado adequado para grandes áreas costeiras. Este modelo surge da necessidade de complementar modelos de águas profundas, a título de exemplo o modelo **WAM** (**WA**ve **Mo**del), (WAMDI Group, 1988), já que ao simular a evolução da agitação

marítima em águas de profundidade finita, tem em conta fenómenos físicos que não são considerados nos outros modelos.

Neste trabalho descreve-se a aplicação do modelo SWAN na zona marítima adjacente a Pinheiro da Cruz. Os dados necessários à aplicação do modelo compreendem dados de ventos à superfície, fornecidos pelo sistema ALADIN, e dados de agitação marítima, proporcionados pelo Programa de Clima Marítimo (Carretero et al., 2000). Foram tidas em conta duas situações de diferentes condições de agitação marítima e ventos: em Janeiro de 2001 às 12 UTC no período de 24 a 25, e em Fevereiro de 2001 às 12 UTC nos dias 6 a 7.

A justificação para a escolha do local e dos períodos em análise baseou-se no facto de se possuir um conjunto de medições válidas realizadas por um perfilador acústico ADCP, fundeado a 19.5m, pelo Instituto Hidrográfico, junto à praia de Pinheiro da Cruz, desde 23 de Janeiro a 15 de Fevereiro de 2001. Desta forma, foi possível efectuar uma comparação dos resultados numéricos com essas observações e por isso avaliar as potencialidades e limitações do modelo SWAN neste caso de estudo.

Previamente foram efectuados um conjunto de testes de sensibilidade que ajudaram na definição quer das características dos dados (resolução da malha de ventos) a fornecer ao modelo quer das condições de cálculo e de fronteira do modelo (dimensões e resolução do domínio de cálculo, resolução temporal, posicionamento de fronteiras, fenómenos físicos a considerar, regime estacionário e não estacionário, entre outros)

É de salientar que para a construção dos ficheiros de dados, execução do modelo SWAN, e para a obtenção e análise dos ficheiros de resultados de forma rápida e sistemática, recorreu-se ao programa SOPRO (Pinheiro et al., 2007) que foi modificado de modo a permitir diferentes condições de forçamento para a introdução do campo de ventos, aplicações em regime não estacionário, entre outras funcionalidades associadas às alterações efectuadas.

## **1.2 OBJECTIVOS E METODOLOGIA**

O objectivo principal deste estudo centrou-se na aplicação e análise do desempenho do modelo SWAN na costa oeste portuguesa, tendo em conta a não estacionariedade imposta pela variação do campo de ventos à superfície.

Este objectivo envolveu as seguintes acções:

- Pesquisa bibliográfica da literatura de referência;
- Análise da estrutura dos ficheiros de dados e de resultados do modelo SWAN, para as diferentes aplicações previstas;
- Modificação do programa SOPRO, permitindo a aplicação sistemática do modelo, para diferentes condições de vento e agitação marítima;

- Testes de sensibilidade realizados com o modelo SWAN para a avaliação da influência de alguns parâmetros do modelo (resolução da malha de ventos ou do domínio de cálculo, aplicações em regime estacionário ou não estacionário) nos resultados numéricos.
- Aplicação do modelo SWAN, na zona adjacente à praia de Pinheiro da Cruz, para duas diferentes situações de agitação marítima e ventos;
- Comparação de resultados numéricos com medições obtidas pelo ADCP;
- Análise e interpretação dos resultados;
- Avaliação das potencialidades e limitações do modelo SWAN.

Desta forma, esta aplicação favoreceu o conhecimento mais aprofundado no domínio da propagação e deformação de ondas em zonas costeiras, quer ao nível dos fenómenos físicos envolvidos, quer ao nível da sua modelação numérica. Permitiu também a familiarização com as condições de aplicação do modelo SWAN, o aperfeiçoamento do programa SOPRO e a avaliação das vantagens e limitações do modelo.

### **1.3 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

O presente trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos, conjuntamente com referências bibliográficas e três anexos principais subdivididos. No primeiro capítulo é feito um enquadramento geral do assunto e relevância da análise do problema. No Capítulo 2 apresentam-se os fundamentos teóricos associados à temática das ondas geradas pelo vento, com uma breve referência à teoria linear da onda e à metodologia utilizada para a análise espectral e estatística. No Capítulo 3 apresenta-se o modelo SWAN, e descreve-se a equação de balanço de energia, explicitando os seus termos fontes e sumidouros para a propagação de energia das ondas. Referem-se também os métodos numéricos utilizados pelo SWAN para integrar a equação de balanço de acção de modo a caracterizar a evolução da agitação marítima. O Capítulo 4 introduz o caso de estudo, as especificidades utilizadas para a descrição deste (entre outros, definição dos domínios de cálculo e das condições de fronteira) e os resultados obtidos com respectiva interpretação. Finalmente no Capítulo 5 apresentam-se as considerações finais retiradas desta aplicação.

## 2. A ONDA GERADA PELO VENTO

### 2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A presença de ondas geradas pelo vento confere um aspecto extremamente irregular à superfície do mar.

O movimento da superfície livre do mar tem, assim, um carácter aleatório, pelo que o recurso a uma descrição estatística e à análise espectral é imprescindível. Por outro lado, a adopção de uma aproximação linear à dinâmica do movimento permite a aplicação do princípio da sobreposição.

O carácter irregular é particularmente evidente na zona de geração. Em locais suficientemente afastados desta zona verifica-se uma maior regularidade, ou seja, menor variabilidade do período e maior comprimento das cristas. A ondulação (*swell*) é a denominação que está associada a esta maior regularidade das ondas observadas num local longe da zona de geração. O espectro direccionado associado à ondulação caracteriza-se por ser “estreito. Contrariamente à ondulação, a vaga (*wind sea*), associada a uma maior irregularidade, é descrita por um espectro mais largo.

### 2.2 TEORIA LINEAR DA ONDA – BREVE INTRODUÇÃO

Considerando um fluido incompressível e um escoamento irrotacional, o princípio de conservação da massa traduz-se na equação de Laplace para o potencial de velocidades  $\phi(x, y, z, t)$ .

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.1)$$

Por conseguinte, localmente, quando a onda se propaga, a viscosidade pode ser desprezada e a densidade pode ser considerada constante horizontalmente.

A equação de Laplace tem de ser complementada com condições fronteira, no fundo e na superfície livre. Para pequenas declividades  $H/L \ll 1$  e para ondas de pequena amplitude quando comparadas com o fundo  $H/h \ll 1$  as condições podem ser linearizadas.

Se o fundo,  $z = -h$ , for impermeável a velocidade normal tem de se anular.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0; z = -h \quad (2.2)$$

Para a superfície livre é necessário considerar duas condições: condição cinemática e dinâmica. A condição cinemática traduz a continuidade da superfície livre (as partículas líquidas não abandonam o meio) e escreve-se (linearizada):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (2.3)$$

sendo  $\eta$  a elevação da superfície livre.

A condição dinâmica exprime o balanço de forças que se exercem na superfície. Não considerando a tensão superficial, a pressão tem de ser igual nas duas faces da superfície, ou seja, a pressão da água tem de ser igual à pressão do ar. Para pressões relativas ( $p_a = 0$ ) esta condição é:

$$\left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_{z=0} = g\eta \quad (2.4)$$

A linearização permite combinar (2.3) e (2.4) de modo a obter:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0; z = 0 \quad (2.5)$$

A solução da equação de Laplace, com as condições de fronteira apresentadas, obtém-se por separação de variáveis e conduz a:

$$\phi(x, z, t) = -\frac{Hg}{2\omega} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cos(kx - \omega t), \quad (2.6)$$

em que  $k = \frac{2\pi}{L}$  o número de onda e o  $L$  comprimento de onda,  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  é a frequência angular, sendo o  $T$  período,  $H$  a altura de onda e  $h$  a profundidade relativa ao nível de repouso, definindo-se  $c = \frac{L}{T}$  como a celeridade ou velocidade de fase.

De (2.5) deduz-se uma relação entre a frequência e o número de onda, designada relação de dispersão, que traduz o carácter dispersivo da propagação das ondas geradas pelo vento na superfície do mar:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad (2.7)$$

Atendendo à definição de celeridade e a  $\sigma = kc$ , a relação de dispersão também pode ser dada por:

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi}{L} h} \quad (2.8)$$



A partir desta expressão obtêm-se as aproximações assintóticas de águas pouco profundas  $c = \sqrt{gh}$  e águas profundas  $c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$ .

Uma vez que a velocidade de fase depende de  $L$  (2.8), define-se uma velocidade de grupo ( $c_g$ ), associada à velocidade de propagação da energia contida numa perturbação constituída por ondas de vários comprimentos de onda por:

$$c_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{1}{2}c \left[ 1 + \frac{4\pi h}{L} \cosh\left(\frac{4\pi h}{L}\right) \right] \quad (2.9)$$

### 2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA E ESPECTRAL

A análise de séries temporais da elevação da superfície livre do mar mostra bem o aspecto irregular e o comportamento aleatório que a caracteriza.

Deste modo, é necessário recorrer a critérios que possibilitem a definição de uma onda individual a partir da serie temporal de valores de elevação. O critério de cruzamento de zero ascendente (c-z-a) considera o acontecimento compreendido entre duas passagens sucessivas pelo nível médio com derivada positiva como uma onda individual (Figura 4). Em consequência, a diferença de cotas entre uma crista e uma cava, e o intervalo de tempo entre dois cruzamentos constituem, respectivamente, a altura e período da onda individual acima definida.

Podem, assim, definir-se uma série de  $N$  valores de  $H_i$  e  $T_i$ , e, conseqüentemente, as estatísticas:

- altura média  $\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i$  (2.10)

- período médio  $\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i$  (2.11)

Ainda no âmbito das estatísticas no domínio do tempo, define-se a altura significativa -  $H_{1/3}$  - como a altura média do terço das alturas de onda mais elevadas do estado de agitação.

Em águas profundas, diversos estudos mostram que a variável aleatória  $H_i$  é bem representada pela função de distribuição de Rayleigh

$$F(H) = 1 - e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2}, \quad (2.12)$$

em que  $H_{rms}$  é a altura média quadrática

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N H_i^2} \quad (2.13)$$

A distribuição de Rayleigh depende de uma única variável característica.

A análise espectral permite a caracterização da superfície livre do mar enquanto processo estocástico, possibilitando a descrição da distribuição de energia dum estado de agitação pelos períodos e direcções das diferentes ondas geradas.

Considerando certas hipóteses simplificativas, como a linearidade e a estacionariedade, obtém-se uma boa aproximação para a representação da elevação da superfície livre do mar recorrendo a um processo estocástico Gaussiano.

Este modelo pode ser encarado como o limite da soma de diferentes ondas sinusoidais geradas em diferentes locais. Assim, a elevação da superfície livre em função do tempo é, aproximadamente, dada por

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^M a_i \cdot \cos(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (2.14)$$

onde  $\eta$  representa a elevação da superfície livre no instante  $t$ ,  $a_i$  e  $\phi_i$  a amplitude e a fase de

carácter aleatório para cada frequência  $f_i = \frac{i}{N\Delta t}$ , respectivamente, sendo  $\Delta t$  o intervalo de

amostragem e verificando-se  $\Delta f = \frac{1}{N\Delta t}$ . A Figura 1 mostra a relação que existe entre os conceitos acima referidos.

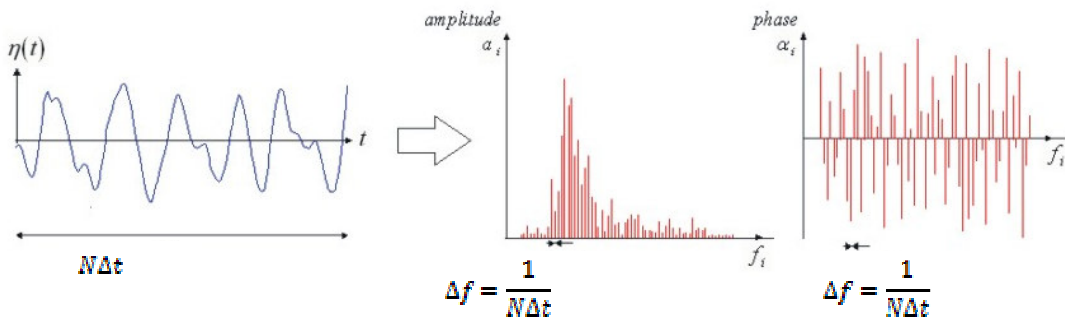


Figura 1 - Observação da elevação da superfície livre e respectivos espectros de amplitude e fase. Holthuijsen, 2007

A expressão seguinte,

$$E(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1/2 a_i^{-2}}{\Delta f} \quad (2.15)$$

permite caracterizar a estrutura probabilística do processo estocástico Gaussiano.

Este modelo para o movimento da superfície livre do mar pode ser generalizado para incluir a direcção de propagação. Considerando, uma vez mais, que a elevação é constituída pela soma de várias ondas harmónicas, tem-se

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{i,j} \cos(\omega_i t - k_i x \cos \theta_j - k_i y \sin \theta_j + \phi_{i,j}) \quad (2.16)$$

onde  $\eta$  representa a elevação da superfície livre em função das coordenadas espaciais horizontais no instante  $t$ ,  $a_{i,j}$  e  $\phi_{i,j}$  a amplitude e a fase de carácter aleatório para cada frequência angular  $\omega_i$  ( $\omega_i = 2\pi f_i$ ),  $k_i$  o número de onda ( $k_i = \frac{2\pi}{L_i}$ ), sendo  $L_i$  o comprimento de onda e  $\theta_j$  a direcção da propagação da onda relativamente ao eixo horizontal,  $x$ . A Figura 2 apresenta uma interpretação gráfica e intuitiva deste modelo de sobreposição.

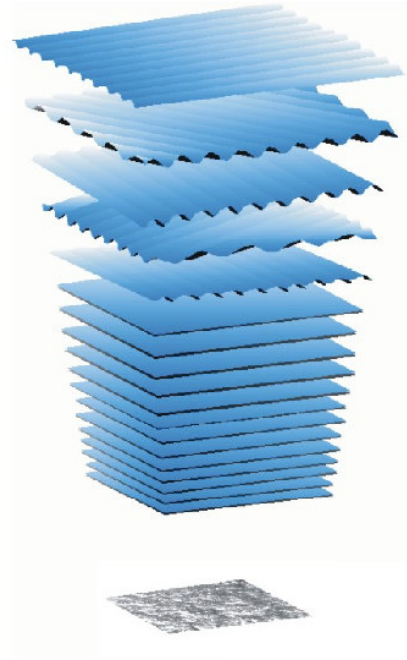


Figura 2 - Representação gráfica da propagação de várias ondas casuais com diferentes características. Holthuijsen, 2007

De um modo análogo, obtém-se o espectro direccionado, que descreve a distribuição de energia pelos períodos e pelas direcções de propagação

$$E(f, \theta) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{\Delta \theta \rightarrow 0} \frac{1}{2} a_i^2 \Delta f \Delta \theta \quad (2.17)$$

O espectro de variância unidimensional pode ser alcançado por meio do espectro direccionado (2.17), integrando este último segundo a direcção

$$E(f) = \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta \quad (2.18)$$

Este tipo de operações está indicado, esquematicamente, na Figura3.

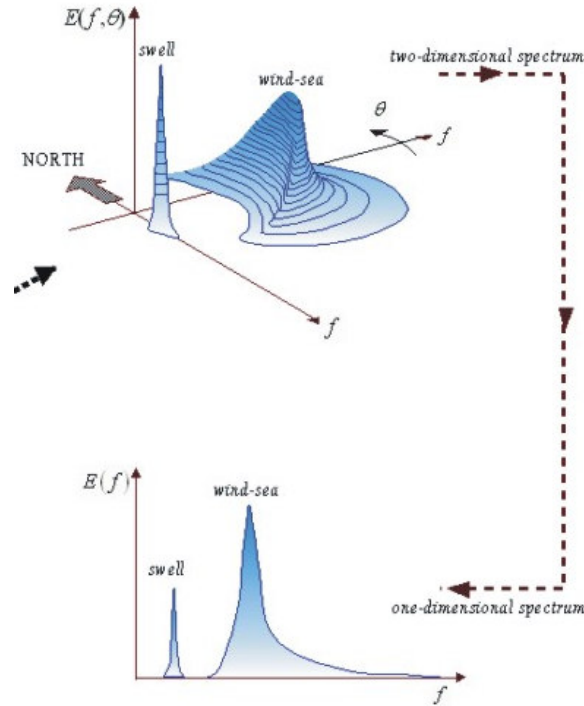


Figura 3 - Representação gráfica de um espectro bidimensional e de um espectro unidimensional. Holthuijsen, 2007.

A teoria linear demonstra que, para ondas de superfície de gravidade, a variância é proporcional à energia mecânica da onda, possibilitando, através do espectro anteriormente obtido, a descrição da distribuição de energia, de um dado estado de agitação, pelos diferentes períodos e direções. O espectro de energia é então obtido pelo produto da aceleração da gravidade  $g$  e da massa volúmica  $\rho$  com o espectro de variância,

$$E_{energia}(f, \theta) = \rho g E_{variância}(f, \theta) \quad (2.19)$$

A partir do espectro definem-se os respectivos momentos  $m_n$ ,

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n E(f) df \quad (2.20)$$

Em particular o momento de ordem zero  $m_0$ , que representa a variância total associada a um determinado estado de mar. Este momento relaciona-se, através do Teorema de Parseval, com a estatística análoga estimada no domínio do tempo,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \eta^2(t) dt = \int_0^{\infty} E(f) df \quad (2.21)$$

Tal permite parametrizar a distribuição de Rayleigh com parâmetros obtidos no domínio da frequência, através do espectro (Ochi, 1998), e, indirectamente, calcular a altura significativa

$$H_s \approx H_{m_0} = 4\sqrt{m_0} \quad (2.22)$$

Igualmente, o período médio de cruzamento de zero ascendente pode ser expresso em termos de momentos espectrais

$$T_{m_{02}} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2.23)$$

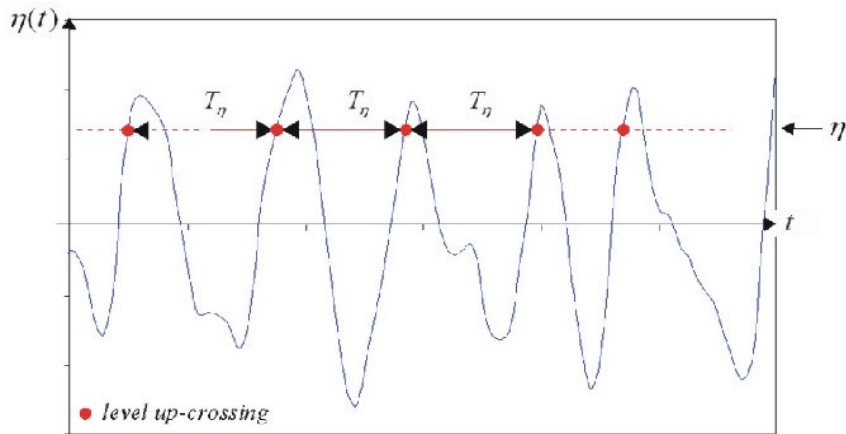


Figura 4 - Cruzamento de zeros ascendentes da elevação da superfície marítima pelo nível  $\eta$  e correspondentes  $T_\eta$ . Holthuijsen, 2007.

No entanto, o momento espectral de segunda ordem é particularmente susceptível a erros derivados de incertezas nas medições ou nas técnicas utilizadas na sua análise. Assim sendo, na prática, verifica-se que o período médio para o cruzamento de nível zero não é o mais apropriado, mas sim o período médio de primeira ordem (Tucker, 1991)

$$T_{m_{01}} = \frac{m_0}{m_1} \quad (2.24)$$

Para representar o espectro em frequência são propostos vários modelos empíricos ou semi-empíricos que são ajustados às observações realizadas no oceano. Um dos espectros empíricos mais utilizados é o de JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) que resultou de uma campanha de medições na costa oeste da Alemanha. O espectro JONSWAP é semelhante ao apresentado por Pierson-Moskowitz, sendo o pico do espectro mais “afiado” (Holthuijsen, 2007)

$$E(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp \left[ -1.25 \left( \frac{f_p}{f} \right)^4 \right] \gamma \exp \left[ \frac{-(f/f_p - 1)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (2.25)$$

$\longleftrightarrow$  Espectro de Pierson-Moskowitz  
 $\longleftrightarrow$  Espectro de JONSWAP

$f_p$  é a frequência de pico espectral,  $\alpha$  a constante de Philips,  $\gamma$  o parâmetro de elevação do pico e  $\sigma$  o coeficiente que traduz a assimetria do espectro.

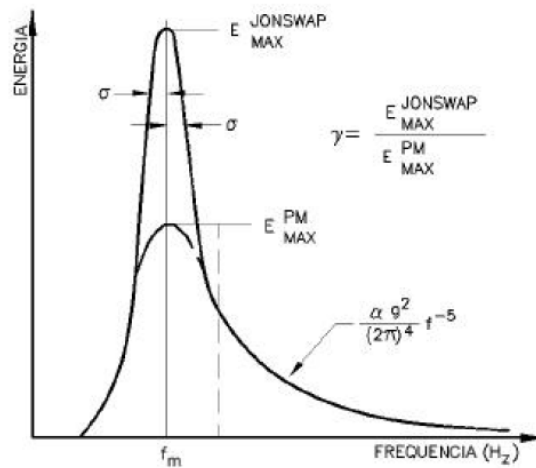


Figura 5 - Comparação entre os espectros de JONSWAP e Pierson-Moskowitz. CEM.

### 3. MODELAÇÃO DA ONDA EM ZONAS COSTEIRAS – MODELO SWAN

#### 3.1 INTRODUÇÃO

O SWAN (*Simulating Waves Nearshore*) (Booij et al., 1999), desenvolvido na Universidade Técnica de Delft (TUDelft), Holanda, é um modelo numérico de terceira geração que permite obter os parâmetros caracterizadores da agitação marítima em águas pouco profundas.

O SWAN, baseado na equação de balanço espectral de variância (Booij et al., 1999), surge da necessidade de complementar os modelos de terceira geração desenvolvidos, essencialmente, para aplicações operacionais em águas profundas. O modelo propaga, no domínio geográfico, o espectro direccional e, conseqüentemente, calcula a evolução das ondas geradas pelo vento em zonas costeiras.

A formulação matemática do modelo envolve não só os fenómenos de geração, dissipação e interacção não linear entre quatro ondas característicos, por exemplo, do modelo WAM (Komen et al., 1994), como também os processos existentes em águas pouco profundas, como a dissipação devido ao atrito do fundo, interacção não linear entre três ondas e rebentação induzida pela diminuição de profundidade.

O artigo de revisão de Battjes (1994) indica a importância relativa dos diferentes processos que afectam a evolução das ondas em águas profundas, intermédias e pouco profundas, estando o seu resumo na Tabela 1.

Tabela 1 - Importância dos diferentes processos que afectam a evolução das ondas em águas profundas, intermédias e pouco profundas. Adaptação do quadro descrito em Battjes (1994).

Processo	Águas profundas	Águas intermédias	Águas pouco profundas
Geração do vento	xxx	xxx	x
Interacções quádruplas	xxx	xxx	x
Interacções triplas	o	o	xx
Rebentação parcial	o	xxx	x
Atrito de fundo	o	xx	xx
Refracção	x	x	xx
Empolamento	o	xx	xxx
Rebentação	o	x	xxx
Reflexão	o	o	x/xx
Difracção	o	o	x

xxx	Dominante
xx	Significativo
x	Pouco relevante
o	Irrelevante

Nas secções seguintes descrevem-se os fundamentos teóricos base do modelo SWAN, nomeadamente, a equação do balanço de energia, e os respectivos termos de propagação de energia, a forma como é introduzido o campo de ventos, a consideração das interacções não lineares entre as ondas e a formulação usada para a dissipação de energia. Também são referidos os métodos numéricos escolhidos para a integração da equação referida para que seja possível alcançar resultados com consistência, estabilidade e convergência.

No final deste capítulo referem-se os procedimentos de pré e pós processamento do modelo SWAN.

## 3.2 ESTRUTURA MATEMÁTICA DO MODELO

### 3.2.1 EQUAÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA

Nas condições descritas no Capítulo 2, o espectro de variância fornece toda a informação necessária à caracterização estatística da superfície livre do mar.

A equação do balanço da energia espectral formulada em coordenadas Eulerianas (3.1) é expressa por

$$\frac{\partial E(f, \theta; x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial \theta} = S(f, \theta; x, y, t) \quad (3.1)$$

Esta equação inclui fenómenos como o empolamento, que está implícito na velocidade de grupo em função da profundidade, e a refração, expressa pela taxa de velocidade de mudança de direcção  $c_{\theta,ref}$ . A difracção não é considerada e a variável  $c_{\theta}$  refere-se exclusivamente ao efeito de refração.

Ao considerar correntes no meio marítimo é necessário ponderar a transferência de energia entre as ondas e as correntes e os efeitos associados a este fenómeno. Neste caso define-se a densidade de acção  $N(\vec{x}, t, \sigma, \theta)$ , no espaço  $\vec{x}$  e no tempo  $t$ , já que esta grandeza se conserva na presença de correntes, contrariamente à energia,

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (3.2)$$

em que  $\sigma$  é a frequência relativa e  $\theta$  a direcção da onda.

Deste modo, a equação do balanço da acção, definida para coordenadas cartesianas, é expressa por

$$\frac{\partial N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{\sigma} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \sigma} = \frac{S(\sigma, \theta; x, y, t)}{\sigma} \quad (3.3)$$



Os termos presentes no lado esquerdo da igualdade referem-se à parte cinemática da equação. O primeiro termo representa a taxa de variação local da densidade de acção no tempo, o segundo e terceiro representam a propagação da acção no espaço geográfico (com velocidades de propagação  $c_{gx}, c_{gy}$ ), o quarto termo a refração induzida pelas correntes e variação de profundidade e finalmente o quinto define a alteração da frequência relativa devido a variações na profundidade e nas correntes. Este último é nulo na ausência de correntes. As quantidades  $c_\theta$  e  $c_\sigma$  representam as velocidades de propagação no espaço espectral.

O termo presente no lado direito da equação,  $S(\sigma, \theta)$ , engloba todos os termos fontes ou sumidouros associados aos fenómenos físicos que geram, dissipam ou redistribuem a energia da onda.  $S(\sigma, \theta)$  pode ser subdividido na geração de energia devido ao vento  $S_{in}(\sigma, \theta)$ , nas interacções não lineares  $S_{nl}(\sigma, \theta)$  e na dissipação da energia  $S_{diss}(\sigma, \theta)$ .

$$S(\sigma, \theta) = S_{in}(\sigma, \theta) + S_{nl}(\sigma, \theta) + S_{diss}(\sigma, \theta) \quad (3.4)$$

O termo  $S_{diss}(\sigma, \theta)$  descreve ainda três fenómenos: atrito do fundo  $S_{diss,b}(\sigma, \theta)$ , rebentação induzida pela diminuição da profundidade  $S_{diss,br}(\sigma, \theta)$  e rebentação parcial  $S_{diss,w}(\sigma, \theta)$ .

### 3.2.2 OS TERMOS DE PROPAGAÇÃO

Quando a onda oceânica se propaga desde a zona de geração até ao local onde se dá a dissipação da sua energia, normalmente em zonas costeiras, a variação da profundidade do fundo oceânico e outros factores ambientais são factores fundamentais a ter em conta, pois afectam em vários aspectos a caracterização da agitação marítima, originando fenómenos como o empolamento, a refração, a difracção, a interacção entre as correntes e as ondas e a rebentação.

Tendo presente a relação de dispersão ( $\sigma^2 = gk \tanh(kh)$ ) verifica-se que o comprimento de onda e a celeridade diminuem com a profundidade.

O efeito do empolamento tem como consequência o aumento da altura, sendo que na ausência de correntes, a frequência correspondente permanece constante.

Para proceder ao cálculo da refração recorre-se à aproximação Euleriana que discretiza o espaço geográfico em várias células. Esta aproximação requer o valor da velocidade de mudança de direcção da onda.

Como foi referido, as ondas são afectadas na sua direcção, frequência e amplitude quando se propagam num meio que tem presente correntes marítimas, quer sejam de maré ou longitudinais, entre outras. A teoria linear é válida para a análise deste novo meio, desde que se

considerem a profundidade e as correntes presentes constantes, no espaço e no tempo. A frequência absoluta  $\omega$  resulta, assim, da soma de duas parcelas: a frequência relativa e o produto do número de onda  $k$  com o vector representativo da velocidade da corrente  $\bar{u}$ .

$$\omega = \sigma + \bar{k} \cdot \bar{u} \quad (3.5)$$

em que  $\sigma$  é a frequência que figura na relação de dispersão (2.7).

Ao considerar que a profundidade e a velocidade das correntes presentes são constantes, induz-se que tanto as frequências relativas como absolutas também o são. Analogamente, se a profundidade ou velocidade variam, as frequências também variam.

Tendo em conta a presença de correntes no meio marítimo, são adoptadas as seguintes expressões no modelo SWAN para as velocidades de propagação da energia da onda  $c_g + \bar{u}$ ,  $c_\theta$  e  $c_\sigma$  no espaço  $x, y$ , no espaço definido por  $\theta$  e no espaço da frequência relativa  $\sigma$ :

$$\frac{dx}{dt} = c_g + \bar{u} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \frac{\sigma \bar{k}}{|\bar{k}|^2} + \bar{u} \quad (3.6)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = c_\theta = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial m} + \bar{k} \frac{\partial \bar{u}}{\partial m} \right] \quad (3.7)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = c_\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial h} \left( \frac{\partial h}{\partial t} + \bar{u} \nabla h \right) - c_g \bar{k} \frac{\partial \bar{u}}{\partial s} \quad (3.8)$$

onde  $s$  é o deslocamento na direcção de propagação,  $h$  a profundidade e  $m$  o deslocamento na perpendicular.

O operador  $\frac{d}{dt}$  refere-se à derivada total no espaço da propagação da energia da onda

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (c_g + \bar{u}) \nabla_x \quad (3.9)$$

### 3.2.3 FORÇAMENTO PELO CAMPO DE VENTOS

Há dois tipos de aproximação que descrevem os mecanismos de transferência da energia do vento para a superfície livre do mar: um considera um crescimento da energia da onda linear no tempo, enquanto que outro defende que o processo de interacção entre o vento e as ondas resulta num crescimento destas de forma exponencial (Ris, 1997).

Com o contributo das teorias mencionadas, descreve-se o efeito do vento na superfície livre como um mecanismo de realimentação, iniciado por um crescimento linear

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (3.10)$$

O termo  $A$  descreve o crescimento linear da energia no tempo, devido a flutuações da pressão atmosférica induzidas pelo vento. A segunda parcela é relativa ao crescimento exponencial da energia. Ambos dependem da frequência e direcção da onda, da velocidade e da direcção do vento.

Na Figura 6 é representado o efeito, na forma do espectro, da transferência de energia devido ao forçamento de um campo de ventos.

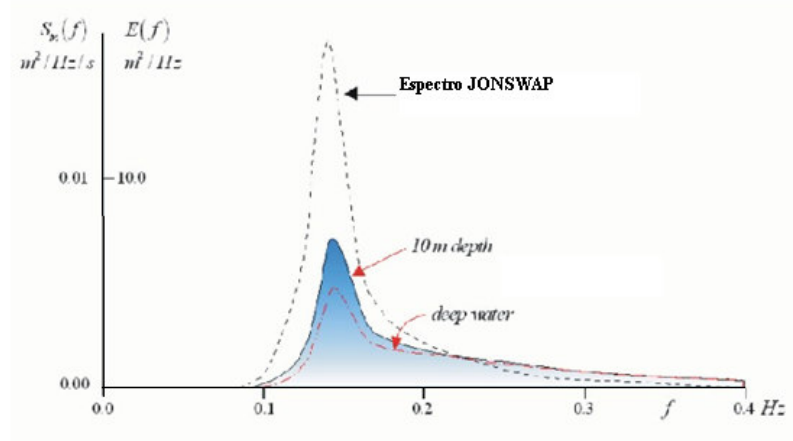


Figura 6 - Representação do efeito, no espectro, do termo fonte relativo ao forçamento de um campo de ventos. Holthuijsen 2007.

Para caracterizar o crescimento exponencial da onda, parâmetro  $B$ , existem duas alternativas, ver Booji et al. (1999).

É de referir que o modelo SWAN converte os valores de entrada do campo de ventos medidos a 10 m de elevação  $U_{10}$  na velocidade de atrito  $u_*$ , através da expressão

$$u_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (3.11)$$

No SWAN, a expressão do coeficiente de arrastamento  $C_D$ , é a seguinte (Holthuijsen, 2007):

$$C_D = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3} & \text{para } U_{10} < 7.5 \text{ m/s;} \\ (0.8 + 0.065 U_{10}) \times 10^{-3} & \text{para } U_{10} \geq 7.5 \text{ m/s;} \end{cases} \quad (3.12)$$

### 3.2.4 INTERACÇÃO NÃO LINEAR DAS ONDAS

Diversos estudos mostraram que é essencial a consideração das interacções não lineares a quatro ondas em águas profundas, já que as mesmas dominam a evolução do espectro (Ris, 1997). Devido a interacções ressonantes com quatro ondas, verifica-se a transferência de energia do pico do espectro para frequências mais baixas e parcialmente para frequências mais elevadas. As interacções não lineares a quatro ondas desempenham, deste modo, um papel importante na

redistribuição de energia do espectro. Na Figura 7 estão representados os efeitos das interações referidas na reconfiguração do espectro de variância.

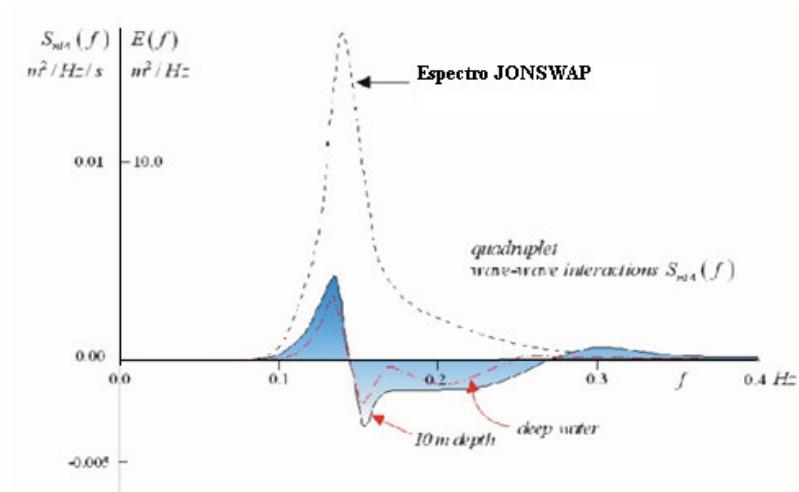


Figura 7 - Representação do efeito das interações não lineares a quatro ondas no espectro de variância. Holthuijsen 2007.

O cálculo das interações não lineares a quatro ondas envolve um integral de Boltzman (Komen et al., 1994). Os modelos numéricos, nomeadamente o SWAN, usam aproximações para este cálculo, de que é exemplo “Discrete Interaction Approximation” (DIA), (Rogers et al., 2002).

Em águas menos profundas, as interações não lineares quase ressonantes a três ondas tornam-se relevantes na evolução do espectro, transferindo energia das frequências mais baixas para as frequências mais altas, tendo como resultado super harmónicas (SWAN Team, 2008). Este processo de transferência de energia pode ser realizado em distâncias muito curtas, mudando a configuração do espectro apreciavelmente. Na Figura 8 são representados os efeitos das interações referidas no espectro de variância.

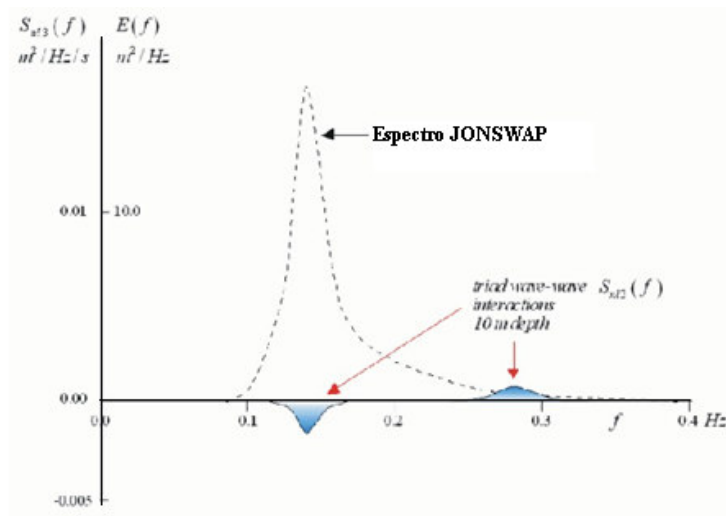


Figura 8 - Representação do efeito das interações não lineares a três ondas no espectro de variância. Holthuijsen 2007.

O modelo SWAN, utiliza o termo relativo às interações não lineares de três ondas,  $S_{nl3}(\sigma, \theta)$ , através da aproximação “Lumped Triad Approximation” – LTA (Eldeberky, 1996).

### 3.2.5 REBENTAÇÃO PARCIAL (“WHITECAPPING”)

A rebentação parcial depende da declividade da onda. No modelo SWAN, analogamente aos modelos de terceira geração actualmente utilizados, a rebentação parcial é formulada através da seguinte expressão (Ris, 1997; SWAN Team, 2008)

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \sigma_m \frac{k}{k_m} E(\sigma, \theta) \quad (3.13)$$

O coeficiente  $\Gamma$  depende da declividade,  $k$  é o número de onda e  $\sigma_m$  e  $k_m$  representam, respectivamente, a frequência média e o número de onda médio (WAMDI group, 1988).

O valor de  $\Gamma$  é estimado através da equação de balanço de energia para um estado completo de desenvolvimento, sendo, por isso, o valor deste coeficiente, dependente do tipo de formulação usada para a representação dos ventos. Como para este fim são utilizadas duas expressões, o coeficiente  $\Gamma$  também vai assumir dois diferentes valores. O modelo SWAN utiliza a formulação dada por Komen et al. (1994), (Mulligan et al., 2008). Na Figura 9 é possível visualizar no espectro de variância, o efeito de dissipação de energia por *whitecapping*.

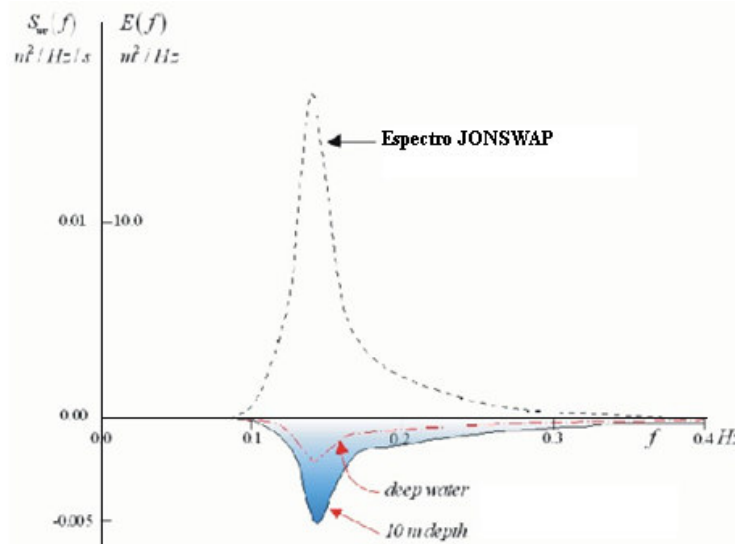


Figura 9 - Representação do efeito da rebentação parcial no espectro de variância. Holthuijsen 2007.

### 3.2.6 ATRITO DE FUNDO

Em águas menos profundas os movimentos orbitais das partículas líquidas estendem-se ao fundo. O atrito de fundo surge assim, no contexto da transferência de energia, como resultado da interação das partículas líquidas com o fundo. A Figura 10 representa, esquematicamente, o efeito da dissipação de energia na forma espectral.

Vários estudos foram realizados com o intuito de criar uma boa caracterização deste fenômeno. O modelo SWAN tem disponíveis três formulações para o atrito no fundo. Todas elas podem ser expressas da seguinte forma

$$S_{ds,b} = -C_b \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kh} E(\sigma, \theta) \quad (3.14)$$

em que  $C_b$  é um coeficiente inerente ao atrito de fundo.

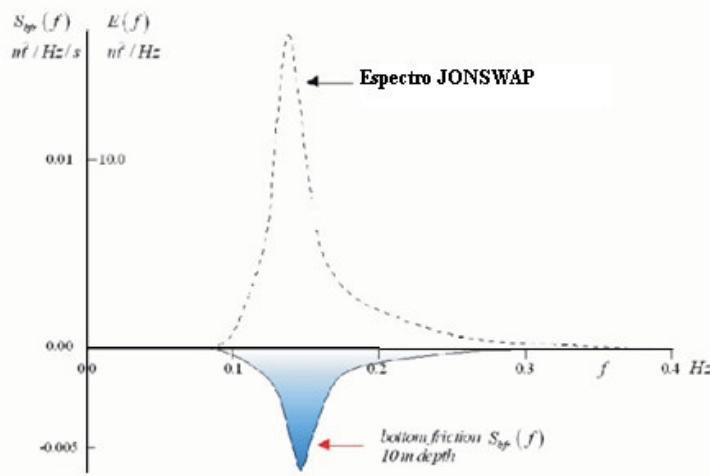


Figura 10 - Representação do efeito do atrito de fundo, em águas pouco profundas, no espectro de variância. Holthuijsen 2007.

### 3.2.7 REBENTAÇÃO INDUZIDA PELO FUNDO

À medida que a profundidade diminui, a energia da onda concentra-se de tal forma que surge um dado instante em que a onda rebenta, dissipando rapidamente energia. Na Figura 11 pode-se observar a referida dissipação de energia.

No modelo SWAN a formulação utilizada para descrever o efeito da rebentação induzida pelo fundo é expressa por

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta) \quad (3.15)$$

sendo  $D_{tot}$  a taxa média de dissipação de energia da onda, por unidade horizontal de superfície (Ris, 1997).

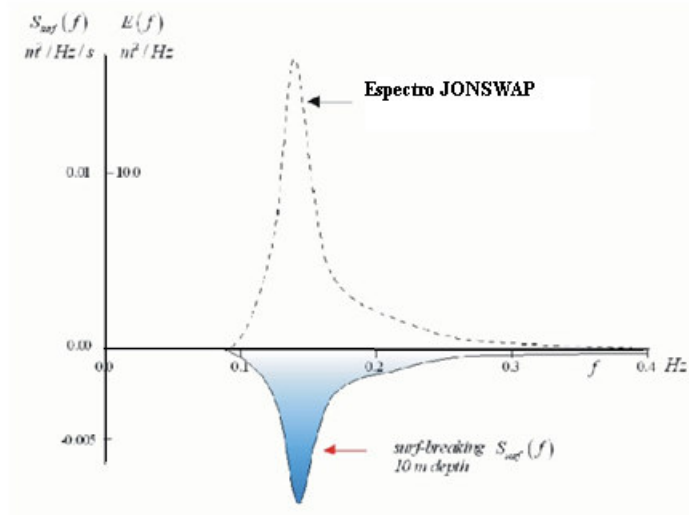


Figura 11 - Representação do efeito da rebentação induzida pelo fundo no espectro de variância. Holthuijsen 2007.

Para um conhecimento mais aprofundado sobre os fenômenos físicos envolventes nos cálculos do SWAN consultar Ris (1997), Booji et al. (1999) ou Holthuijsen (2007).

### 3.3 IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA

#### 3.3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Como referido, o modelo SWAN é um modelo de terceira geração, estando esta denominação aliada ao facto de que no cálculo das interacções quádruplas não lineares onda - onda o espectro desenvolve-se livremente sem qualquer imposição de forma *a priori*, (Holthuijsen, 2007).

Baseado na equação de balanço espectral (Booji et al., 1999), o modelo propaga o espectro, a partir do conhecimento das condições de fronteira, vento, batimetria e correntes.

Para alcançar resultados verosímeis é essencial ter em conta a exactidão das aproximações numéricas que são realizadas para os fenômenos físicos.

Ao estar perante ondas geradas pelo vento, de natureza aleatória, têm-se múltiplas escalas de tempo que conferem uma dificuldade acrescida para os modelos de terceira geração. Deste modo, é necessário distinguir os erros numéricos dos erros derivados da modelação dos processos físicos.

Quando se deseja utilizar um modelo numérico, uma das maiores preocupações é referente ao tempo de cálculo dispendido. Neste sentido, a escolha dos esquemas numéricos para a propagação das ondas através do espaço geográfico é de extrema importância, sendo que devem satisfazer critérios de estabilidade, consistência e convergência (Smith, 1978). Usualmente são utilizados, para águas profundas, modelos que se baseiam em esquemas

explícitos e de diferenças finitas. No entanto, para aplicações em águas pouco profundas, denota-se que o intervalo de tempo utilizado deveria ser muito pequeno, tornando os cálculos economicamente inviáveis. Tal implicação é derivada do critério de Courant – Fredrichs – Levy (CFL), que afirma que a energia da onda, num passo temporal, não se pode propagar nas direcções  $x$  e  $y$  através de mais do que uma célula geográfica  $\Delta x$  e  $\Delta y$ , ou, o que é equivalente, limita as velocidades de propagação no espaço numérico,

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c_{g,x}} ; \Delta t \leq \frac{\Delta y}{c_{g,y}} \quad (3.16)$$

No modelo SWAN a equação do balanço de acção (3.3) é integrada através de esquemas numéricos implícitos, pelo método de diferenças finitas, no tempo, espaço geográfico e espaço espectral.

O tempo é discretizado, com um intervalo de tempo  $\Delta t$  constante, para integrar, simultaneamente os termos relativos à propagação das ondas e os termos fonte  $S(\sigma, \theta)$ . O espaço geográfico é descrito por uma malha rectangular definida por células  $\Delta x$  e  $\Delta y$  constantes nas direcções  $x$  e  $y$  respectivamente. O espaço espectral é discretizado através de uma resolução, constante, direcciona  $\Delta \theta$  e de frequência relativa  $\Delta \sigma / \sigma$ .

De modo a obter uma solução mais económica, é possível, no SWAN, limitar os valores das direcções relativas à origem das componentes das ondas.

É necessário também, o utilizador impor dois valores limite fixos para as frequências, inferior  $f_{\min}$  e superior  $f_{\max}$ . Os valores assumidos são valores tipicamente presentes na agitação, sendo  $f_{\min}$  igual a 0.04 Hz e  $f_{\max}$  igual a 1 Hz. Neste intervalo, o espectro desenvolve-se livremente sendo o conjunto das frequências descrita por uma distribuição logarítmica. Para valores menores que  $f_{\min}$  as densidades espectrais são assumidas com valor nulo. Para valores superiores a  $f_{\max}$  é imposto no espectro uma forma do tipo  $f^m$  de forma a calcular as interacções não lineares entre as ondas nas frequências mais elevadas. O SWAN adopta o valor de  $m$  mediante a formulação escolhida para o termo associado ao forçamento pelo vento.

### 3.3.2 PROPAGAÇÃO NO ESPAÇO GEOGRÁFICO E ESPECTRAL

O esquema numérico utilizado pelo SWAN é implícito e resolve as derivadas parciais, presentes nas equações inerentes ao processo de propagação no espaço de frequência e direcção, pelo método de diferenças finitas.

Através de experiências realizadas com o modelo de segunda geração HISWA (Holthuijsen et al., 1989), verificou-se que para zonas costeiras, modelos baseados na equação de balanço espectral (3.3) podem ser associados, para a propagação no espaço geográfico, a



esquemas numéricos implícitos de primeira ordem de diferenças regressivas, denominados “*upwind schemes*” (Holthuijsen, 2007).

$$\frac{\partial c_{g,y} N(\sigma, \theta)}{\partial y} \approx \left[ \frac{[c_y N]_i - [c_y N]_{i-1}}{\Delta y} \right]_{t+1} \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial c_{g,x} N(\sigma, \theta)}{\partial x} \approx \left[ \frac{[c_x N]_i - [c_x N]_{i-1}}{\Delta x} \right]_{t+1} \quad (3.18)$$

Ao usar o esquema referido, o espaço direccional é decomposto em quatro quadrantes em cada ponto do espaço geográfico. Os cálculos são realizados em cada quadrante independentemente dos restantes, com excepção da acção de energia que se move através das fronteiras entre os quadrantes. A transferência de energia ou de acção que se dá entre as componentes das ondas oriundas de diferentes direcções é assim tida em conta iterativamente. Depois de cumpridas as quatro fases, a energia da onda foi propagada no total do domínio geográfico. A Figura 12 é representativa dos quatro quadrantes constituintes de cada ponto do espaço geográfico.

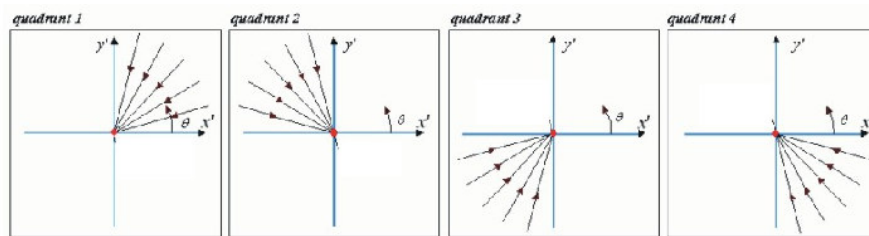


Figura 12 - Solução utilizada no modelo SWAN para propagação da energia das ondas no espaço geográfico, nos quatro quadrantes. Holthuijsen 2007

Tal como na propagação no espaço geográfico, o critério de Courant-Fredrichs-Levy (CFL) também se aplica ao espaço espectral. O parâmetro CFL não deverá exceder a unidade, de modo a seguir-se um critério de estabilidade nas aproximações numéricas feitas. A exactidão dos resultados, como referido, também é um dos critérios que um esquema numérico deve satisfazer. Se por um lado o SWAN utiliza, exclusivamente, um esquema numérico implícito de primeira ordem de diferenças regressivas para a propagação no espaço geográfico, já para o espaço espectral a situação é diferente. A propagação no espaço espectral exige uma maior exactidão, pelo que se adopta uma combinação entre um esquema de segunda ordem de diferenças centradas, mais económico a nível do tempo dispendido nos cálculos, e um esquema de primeira ordem de diferenças regressivas.

$$\frac{\partial c_{\sigma} N(\sigma, \theta)}{\partial \sigma} = \left[ \frac{(1 + \mu)(c_{\sigma} N)_{i_{\sigma}+1} - 2\mu(c_{\sigma} N)_{i_{\sigma}} - (1 - \mu)(c_{\sigma} N)_{i_{\sigma}-1}}{2\Delta\sigma} \right]_{i_{\sigma}+1} \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial c_{\theta} N(\sigma, \theta)}{\partial \theta} = \left[ \frac{(1 + \nu)(c_{\theta} N)_{i_{\theta}+1} - 2\nu(c_{\theta} N)_{i_{\theta}} - (1 - \nu)(c_{\theta} N)_{i_{\theta}-1}}{2\Delta\theta} \right]_{i_{\theta}+1} \quad (3.20)$$

Através da combinação dos esquemas referidos é possível, mediante a preferência da precisão que o utilizador deseja, escolher o tipo de esquema numérico a usar. Para os parâmetros  $\mu = 0$  e  $\nu = 0$ , tem-se um esquema implícito de diferenças centradas, sendo que para  $\mu = 1$  e  $\nu = 1$ , o utilizador opta pelo esquema implícito de diferenças retardadas.

O modelo SWAN apresenta três alternativas na escolha do esquema numérico implícito a usar para o processo de propagação das ondas no espaço geográfico e espectral, mediante os critérios do utilizador na realização dos cálculos e resultados que deseja realizar e obter. Têm-se desta forma:

- O esquema de primeira ordem de diferenças retardadas, BSBT – “*Backward Space, Backward Time*” - aplicado quer para condições estacionárias ou não estacionárias;
- O esquema de segunda ordem S&L (Stelling and Leendertse, 1992), usado para condições não estacionárias;
- O esquema de segunda ordem SORDUP – “*Second ORDER, UPwind*” - (Rogers et al., 2002), utilizado para condições estacionárias.

Junto a fronteiras abertas, obstáculos ou costa, o esquema BSBT, descrito no Anexo A.1, é o utilizado independentemente do esquema escolhido. Os esquemas S&L e SORDUP possibilitam cálculos com maior precisão ao substituírem, nas integrações descritas, os termos que representam a propagação no espaço geográfico por outras expressões, relatadas nos Anexos A.2 e A.3, respectivamente.

### 3.3.3 GERAÇÃO, DISSIPACÃO E INTERACÇÕES NÃO LINEARES ONDA - ONDA

As aproximações numéricas para os termos fonte  $S(\sigma, \theta)$  são, essencialmente, implícitas, havendo alguns casos em que o cálculo pode ser realizado com um esquema explícito.

O parâmetro  $A$ , descrito na equação (3.10), relativo ao crescimento linear da energia da onda, não depende da forma do espectro, pelo que pode ser directamente integrado, explicitamente, pelos valores conhecidos das características do vento, velocidade e direcção. Todos os restantes termos, responsáveis pela transferência de energia das ondas, são dependentes da densidade de energia, podendo ser descritos por  $S = \phi E$ , onde  $\phi$  é um coeficiente resultante dos parâmetros integrais das ondas.

O SWAN integra os termos fonte, ou seja, a geração da onda pelo vento e as interacções não lineares a três e quatro ondas quando positivas, explicitamente de forma a alcançar um modelo mais estável. O esquema explícito então utilizado é descrito pelo termo fonte no nível  $n$  e pela iteração do nível anterior da densidade de energia  $E^{n-1}$

$$S^n \approx \phi^{n-1} E^{n-1} \quad (3.21)$$

Contrariamente às contribuições positivas, os sumidouros, isto é, rebentação parcial, atrito de fundo, rebentação induzida pelo fundo e interacções não lineares a três e quatro ondas quando negativas requerem um esquema implícito de modo a obter um modelo incondicionalmente estável.

Os procedimentos no SWAN, para os termos sumidouro, subdividem estes consoante forem fortemente ou ligeiramente não lineares.

A rebentação induzida pela diminuição da profundidade é traduzida por um fenómeno fortemente linear, pelo que é estimada no nível  $n$  da iteração, com uma aproximação linear do nível anterior  $n-1$

$$S^n \approx \phi^{n-1} E^n + \left( \frac{\partial S}{\partial E} \right)^{n-1} (E^n - E^{n-1}) \quad (3.22)$$

Os restantes termos negativos, onde os efeitos não lineares são mais fracos, a rebentação parcial, o atrito de fundo e as interacções não lineares a três e quatro ondas, são integrados de uma forma análoga:

$$S^n \approx \phi^{n-1} E^{n-1} + \left( \frac{S}{E} \right)^{n-1} (E^n - E^{n-1}) \quad (3.23)$$

Com  $S = \phi E$ , a expressão fica reduzida a

$$S^n \approx \phi^{n-1} E^n \quad (3.24)$$

### 3.4 PROCEDIMENTOS DE PRÉ E PÓS PROCESSAMENTO

Para iniciar os cálculos é necessário fornecer ao modelo um ficheiro com dados de batimetria e um ficheiro de entrada que defina todos os parâmetros de configuração do modelo. Estes parâmetros estão relacionados com as condições de fronteira, a definição do domínio

geográfico, espectral e temporal (caso se introduza a não estacionariedade), os fenómenos físicos a considerar nos cálculos a efectuar e o tipo de saída de dados

De forma a integrar numericamente a equação do balanço de acção, o utilizador deve assim fornecer, na malha computacional, as condições de fronteira no espaço geográfico e espectral.

Nas fronteiras laterais, perpendiculares à linha da costa, é normal não haver informação, pelo que ao não se introduzir qualquer condição, a densidade espectral é considerada nula nas zonas adjacentes. Ao se imporem estas condições laterais, os resultados vão ter sempre alguns erros inerentes à propagação destas ondas através da área computacional. A zona afectada, no total do domínio, por tal situação é dependente das condições marítimas, leiam-se ondulação ou vaga, sendo a região definida pela largura da distribuição direccional da energia da onda. Numa situação de *wind sea* o ângulo será tipicamente  $30^\circ$ , enquanto que para o *swell* variará entre  $5^\circ$  e  $10^\circ$ , Figura 13 (SWAN Team, 2008)

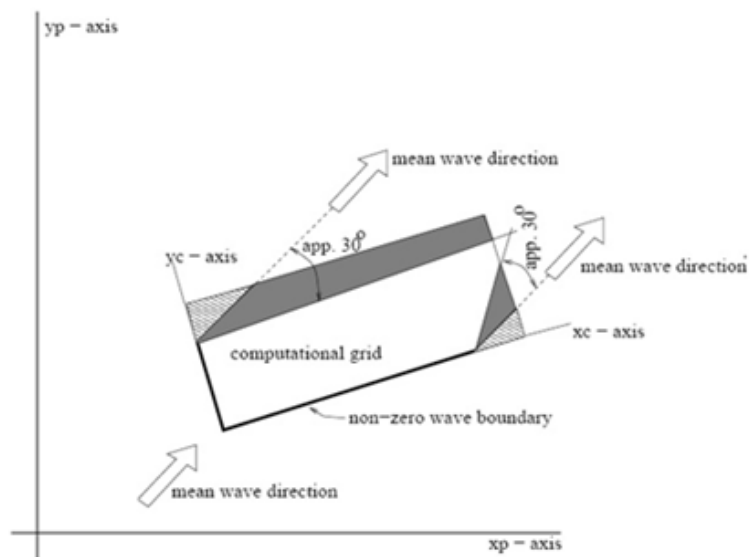


Figura 13 - Regiões afectadas pelas condições de fronteira no domínio computacional a sombreado. SWAN Team (2008)

Independentemente do tipo de fronteira, o modelo assume que toda a energia da onda que “sai” do domínio computacional é por este perdida. A energia que “entra” no domínio, usualmente, faz parte de uma fronteira paralela à linha da costa, sendo esta necessariamente provida pelo utilizador.

É possível, no modelo SWAN, introduzir a agitação marítima como condição de fronteira na forma paramétrica ou espectral. No primeiro caso é necessário fornecer os valores da altura significativa, do período médio ou de pico, da direcção média para a frequência de pico e da

dispersão em direcção. No segundo caso as condições de fronteira fornecidas ao SWAN são especificadas por:

- Um espectro bidimensional discreto  $E(\sigma, \theta)$ ;
- Um espectro unidimensional discreto  $E(\sigma)$  acompanhado pela direcção média e dispersão para cada frequência;
- Um espectro unidimensional empírico com uma distribuição direccional empírica.

Para a terceira alternativa, o SWAN apresenta três hipóteses para a imposição do espectro: o espectro JONSWAP, o espectro Pierson-Moskowitz e o espectro de forma Gaussiana, (Ris, 1997).

Para os espectros paramétricos de JONSWAP ou Pierson-Moskowitz, o modelo gera os espectros através do produto da expressão apresentada em (2.25) com a distribuição direccional  $D(\theta)$ , obtida por  $D(\theta) = A_1 \cos^m(\theta)$ . O coeficiente  $A_1$  é uma função de  $m$  de modo a

$$\int_0^{2\pi} D(\theta) d\theta = 1.$$

O modelo permite ainda a escolha entre a convenção Náutica ou Cartesiana, na entrada e na saída dos dados, para a direcção das ondas e do vento. A convenção Náutica define um sistema de eixos onde, relativamente ao Norte geográfico, a direcção de onde os ventos e as ondas provêm, se mede no sentido dos ponteiros do relógio. Já na convenção Cartesiana as medições são feitas, no sentido contrário dos ponteiros do relógio tendo como origem o eixo  $Ox$  positivo, relativamente à direcção para onde os vectores referentes ao vento e ondas apontam.

O SWAN possibilita a definição da localização geográfica da zona em estudo, tal como a sua dimensão e respectiva resolução e ainda a escolha entre um sistema de coordenadas geográficas ou cartesianas. No sistema cartesiano, a origem geográfica (0,0) de todos os domínios é definida pelo utilizador, sendo as respectivas localizações determinadas relativamente a um “sistema local de coordenadas” - *Problem coordinates* (Figura 14).

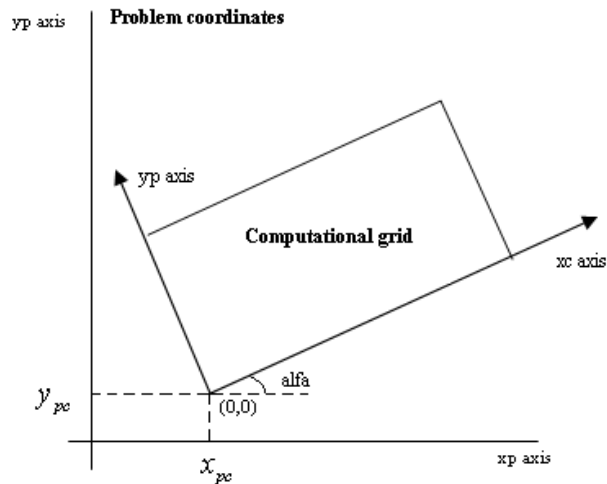


Figura 14 - Coordenadas  $x_{pc}$  e  $y_{pc}$  correspondentes à origem do domínio de cálculo, relativamente ao “sistema local de coordenadas”. Adaptação de imagem de SWAN Team (2008).

Para um domínio de grandes dimensões o modelo SWAN permite a execução de várias corridas encaixadas, isto é, a definição de domínios acoplados com diferentes dimensões e resoluções, de modo a obter uma descrição mais realista dos parâmetros de agitação marítima.

No espaço direccional, o SWAN realiza todos os cálculos das componentes das ondas advindas do intervalo de direcções que o utilizador impuser.

O modelo SWAN permite ao utilizador, ainda, incluir diferentes fenómenos físicos que podem afectar a propagação das ondas. A título de exemplo têm-se a refacção, o empolamento, o atrito de fundo, a rebentação parcial e induzida pela diminuição de profundidade, as interações não lineares a três e quatro ondas e a interacção com as correntes na forma de refacção, de empolamento e de variação de frequência.

A saída de dados pode ser controlada pelo utilizador, podendo-se definir as suas localizações e tipos (em forma paramétrica e/ou espectral).

## 4. CASO DE ESTUDO – PINHEIRO DA CRUZ

### 4.1 ENQUADRAMENTO

O caso de estudo em questão refere-se à zona da praia de Pinheiro da Cruz (conhecida igualmente por praia da Raposa), inserida na costa oeste portuguesa. Esta aplicação tem como objectivo a verificação e análise do desempenho do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima na região referida.

A praia de Pinheiro da Cruz situa-se a norte de Sines, aproximadamente a meio do arco Sado-Sines. A batimetria adjacente a esta zona apresenta uma diminuição de profundidade na aproximação à costa, sendo relativamente paralela a esta (com excepção do canhão de Setúbal), (Figura 15).

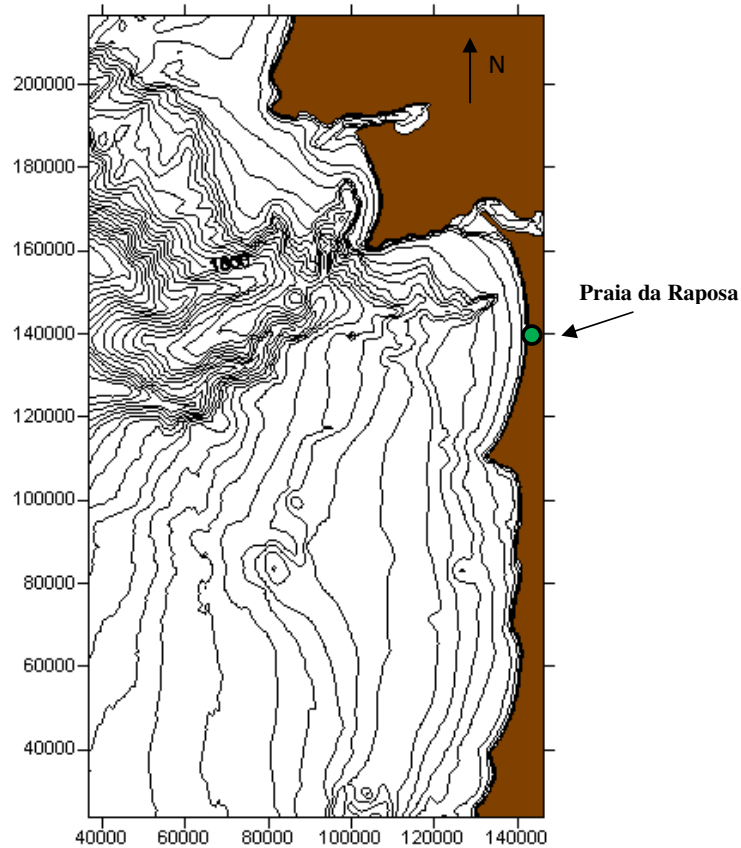


Figura 15 - Batimetria da zona adjacente à praia da Raposa e respectiva localização.

A agitação marítima nesta zona resulta, essencialmente, de ondas oceânicas com origem nos quadrantes NW-W-SW.

Para esta região, e no âmbito do projecto PAMMELA (Pires Silva et al., 2002), foi efectuado um conjunto de medições com um ADCP, fundeado em águas de profundidade

intermédia, dispondo-se de dados de agitação marítima de 23 de Janeiro a 15 de Fevereiro de 2001.

É pois um excelente local para a aplicação e análise do desempenho do modelo SWAN, avaliando-se as suas limitações e potencialidades.

É de salientar que já outros trabalhos foram realizados neste âmbito de investigação, tal como Pires-Silva et al. (2000), Pires Silva et al. (2002), entre outros, com o objectivo de otimizar resultados e obter assim uma boa caracterização da agitação marítima neste mesmo local.

Neste trabalho, o modelo SWAN é aplicado à zona adjacente à praia de Pinheiro da Cruz, para dois episódios marítimos de características excepcionais na nossa costa, sendo relativos a dias de fortes tempestades, 24 e 25 de Janeiro e 6 e 7 de Fevereiro do ano de 2001. Foram definidos os diferentes domínios de cálculo, as condições de fronteira e o campo de ventos. A variabilidade no campo das correntes não foi considerada de todo já que, na zona em estudo, não é relevante o valor da velocidade das correntes face à celeridade presente na propagação das ondas.

Os resultados numéricos, em termos de parâmetros estatísticos e espectros direccionais são comparados com as medições efectuadas pelo ADCP. Deste modo, nas secções que se seguem, descreve-se esta aplicação do modelo SWAN à zona marítima adjacente a Pinheiro da Cruz. Primeiramente, descrevem-se os dados existentes correspondentes à agitação marítima, o campo de ventos e as medições feitas pelo ADCP. Posteriormente, referem-se as características dos domínios de cálculo e as condições de fronteira impostas. Finalmente, apresentam-se os cálculos do SWAN, incluindo testes de sensibilidade, e a comparação e interpretação daqueles com a informação oriunda do ADCP.

Para facilitar a construção dos ficheiros de dados, a aplicação do modelo SWAN e a obtenção e análise de resultados, utilizou-se o programa SOPRO (Pinheiro et al., 2007). No entanto, efectuaram-se importantes modificações pois o programa não estava preparado para uma aplicação com o grau de exigência como a que se apresenta.

Com efeito, no início deste trabalho, o programa SOPRO, desenvolvido pelo LNEC e utilizado como interface na aplicação do modelo SWAN, aceitava apenas cálculos em modo estacionário, não permitindo a introdução de condições de fronteira variáveis no tempo, tanto a nível paramétrico como espectral, aplicações em regime não estacionário e saídas de resultados em diferentes instantes de tempo, entre outras funcionalidades. De modo a resolver estas limitações, foram introduzidas subrotinas do programa SOPRO ajustando-se este às exigências deste e de futuros trabalhos com semelhante cariz. No Anexo B.1 é possível a visualização resumida de como o SOPRO se desenvolveu.



## 4.2 DADOS DISPONÍVEIS

### 4.2.1 AGITAÇÃO MARÍTIMA

Como referido, no modelo SWAN é possível introduzir a agitação marítima como condição de fronteira do domínio de cálculo na forma paramétrica ou espectral.

Inicialmente, recorreu-se aos dados fornecidos, sob a forma de espectro 2D, pelo Instituto de Meteorologia processados pelo WAM, numa escala global, no ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) para a costa portuguesa nas coordenadas 38°N 10°W. No entanto, na análise destes verificou-se que o valor das alturas significativas para os períodos de 24 e 25 de Janeiro e 6 e 7 de Fevereiro não eram coerentes com a situação de tempestade conhecida *a priori*. Em particular, havia uma discrepância de aproximadamente 3 metros na altura significativa com os dados fornecidos pelo PCM (Programa de Clima Marítimo) que implementa o modelo WAM, numa escala regional, usando como função forçadora, um campo de ventos do modelo meso-escala HIRLAM da Meteorologia Espanhola (Carretero et. al, 2000). Os ficheiros de saída do WAM contêm valores integrais da altura significativa, período de pico e direcção média para a frequência de pico. Os dados correspondem a saídas deste modelo de 3 em 3 horas, nos pontos 38°N 10°W e 38°15'N 9°15'W (Figura 16). Neste último havia também disponíveis os espectros direccionais.

Esta discrepância pode ser explicada pelo nível de resolução, tipo de interpolação e diferentes campos de ventos utilizados pelo ECMWF e PCM. Carretero et al. (2000) recomendam a adopção de uma malha de alta resolução para aplicações ao largo da Península Ibérica.



Figura 16 - Localização dos pontos de saída do WAM. Foto NASA adaptada.

O modelo WAM utiliza a convenção náutica. No entanto, não segue a mesma definição dada pelo modelo SWAN. Aquele refere-se à direcção para onde o vento e ondas apontam. No Anexo B.2 explica-se a correspondência feita entre os dois. O WAM baseia-se igualmente na equação do balanço de energia, podendo ser executado em coordenadas esféricas ou cartesianas e numericamente usa o método de diferenças finitas. Por estudos já efectuados, verifica-se que é bastante eficaz para escalas oceânicas, não apresentando, todavia, o mesmo nível de precisão em zonas costeiras. A complementaridade das escalas a que estes modelos operam leva a que sejam utilizados em estudos de transposição de agitação marítima do largo para a costa.

O ficheiro de dados na forma paramétrica (WAM – PCM) não continha os valores da dispersão para cada passo temporal. Estudos anteriores revelam, na costa portuguesa, uma gama de variação deste parâmetro na ordem dos 20° - 30°. Contudo, para episódios da natureza dos acima referidos, é provável que exiba valores menores. A referida ausência no ficheiro de dados foi contornada com o procedimento a seguir descrito. Os cálculos efectuados (Anexo B.2) foram baseados em Holthuijsen (2007), sendo a dispersão calculada em função do espectro direccional, em que  $\theta' = \theta - \bar{\theta}$ .

$$\sigma_{\theta}^2 = \int_{-\pi}^{+\pi} [2 \sin(\frac{1}{2}\theta')]^2 D(\theta) d\theta \quad (4.1)$$

Para este cálculo e para o ponto 38°N 10°W,  $D(\theta)$  é o espectro fornecido pelo Instituto de Meteorologia. As saídas do WAM iniciam-se as 12 UTC de cada período em análise, sendo feitas de 6 em 6 horas. Considerou-se assim que a dispersão, de 3 em 3 horas, assumiria os mesmos valores no intervalo das 6 horas. Para o ponto 38°15'N 9°15'W, recorreu-se aos espectros cedidos pelo PCM.

Cálculos preliminares revelaram que ao usar parâmetros integrais na fronteira, se deve optar pelo valor do período de pico no lugar do período médio de modo a obter resultados mais ajustados. A diferença de resultados para os diferentes tipos de ficheiros de entrada apresenta-se no Anexo C.1.

Foram então introduzidos ficheiros de entrada com parâmetros integrais de modo a forçar as condições de fronteira a Oeste do domínio computacional nas coordenadas 38°N 10°W e 38°15'N 9°15'W. Os valores correspondentes para a situação de 24 e 25 de Janeiro (Tabela 2 e 4) e 6 e 7 de Fevereiro (Tabela 3) apresentam-se de seguida.

Tabela 2 - Valores utilizados para o forçamento da fronteira Oeste do domínio no ponto 38°N 10°W, nos dias 24 e 25 de Janeiro de 2001

AnoMêsDia.Hora	Hs (m)	Tp (s)	$\theta$ (graus)	$\sigma_{\theta}$ (graus)
20010124.12	6.94	17.99	290.42	13.54
20010124.15	6.82	17.99	290.45	13.54
20010124.18	7.05	17.99	285.93	13.45
20010124.21	7.32	17.99	283.10	13.45
20010125.00	7.27	16.35	286.30	6.320
20010125.03	7.15	16.35	289.10	6.320
20010125.06	6.94	16.35	287.98	11.91
20010125.09	6.73	16.35	290.26	11.91
20010125.12	6.76	16.35	292.55	10.85

Tabela 3 - Valores utilizados para o forçamento da fronteira Oeste do domínio no ponto 38°N 10°W, nos dias 6 e 7 de Fevereiro de 2001

AnoMêsDia.Hora	Hs (m)	Tp (s)	$\theta$ (graus)	$\sigma_{\theta}$ (graus)
20010206.12	8.76	17.99	267.13	11.65
20010206.15	9.18	17.99	263.65	11.65
20010206.18	8.54	17.99	274.51	11.72
20010206.21	8.26	17.99	280.58	11.72
20010207.00	8.27	17.99	282.16	7.25
20010207.03	8.29	17.99	283.98	7.25
20010207.06	8.38	17.99	285.97	14.43
20010207.09	8.64	17.99	285.79	14.43
20010207.12	9.10	17.99	281.95	15.13

Tabela 4 - Valores utilizados para o forçamento da fronteira Oeste do domínio no ponto 38°15'N 9°15'W nos dias 24 e 25 de Janeiro de 2001

AnoMêsDia.Hora	Hs (m)	$T_{m01}$ (s)	$\theta$ (graus)	$\sigma_{\theta}$ (graus)
20010124.12	6.52	11.75	288	18.59
20010124.15	6.42	11.39	288	18.42
20010124.18	6.46	10.35	285	18.87
20010124.21	6.59	9.85	282	16.67
20010125.00	6.61	10.45	284	17.56
20010125.03	6.58	10.87	286	17.42
20010125.06	6.5	10.56	287	17.1
20010125.09	6.34	10.29	287	16.34
20010125.12	6.2	10.17	288	15.95

#### 4.2.2 CAMPO DE VENTOS

O campo de ventos utilizado no domínio computacional, e referentes ao período em estudo, foi estimado através do modelo **ALADIN** (**A**ire **L**imitée, **A**daptation dynamique, **D**éveloppement **I**nter**N**ational), tendo sido cedidos pelo Instituto de Meteorologia (IM). Esta estima diz respeito à altitude de referência de 10 metros. Foram facultadas duas resoluções:

12.7 km e 5.6 km. É de salientar que no período que foi objecto de simulação, o vento assumiu valores típicos de 12m/s e direcção de 350° (convenção náutica).

#### 4.2.3 MEDIÇÕES EFECTUADAS NA PRAIA DE PINHEIRO DA CRUZ

Os resultados obtidos foram comparados com os dados fornecidos por um perfilador acústico, ADCP - *Acoustic Doppler Current Profilers* – fundeado a 19.5m, pelo Instituto Hidrográfico, na localização 38°15'55'' N 8° 46'99''W (Figura 17)

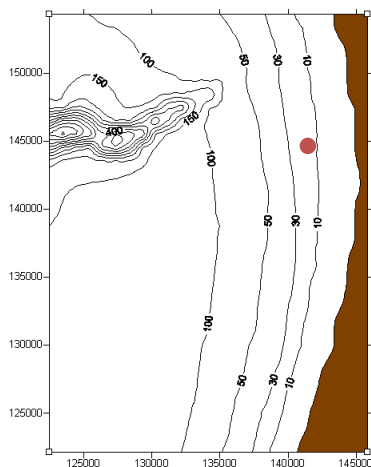
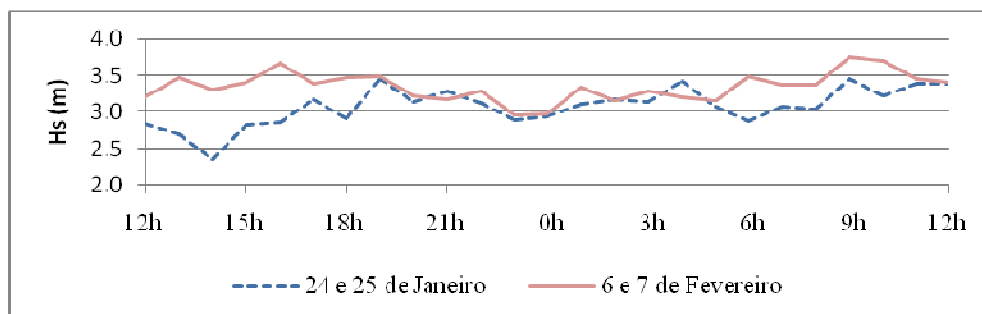


Figura 17 - Localização do ADCP (●).

Os perfiladores acústicos permitem a obtenção dum perfil das correntes ao longo de uma coluna de água, tendo em conta o efeito Doppler, que se baseia na alteração da frequência do impulso quando existe um movimento relativo entre a fonte emissora e o alvo. Alguns destes permitem ainda a medição da agitação marítima.

O ADCP instalado na praia de Pinheiro da Cruz mediu valores das correntes e agitação, nomeadamente, entre outros, altura significativa ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ) e direcção média correspondente à frequência de pico ( $D_p$ ), numa base horária no período de 23 de Janeiro a 15 de Fevereiro de 2001. Na Figura 18 é apresentada a evolução temporal dos valores de  $H_s$ ,  $T_p$  e  $D_p$ .



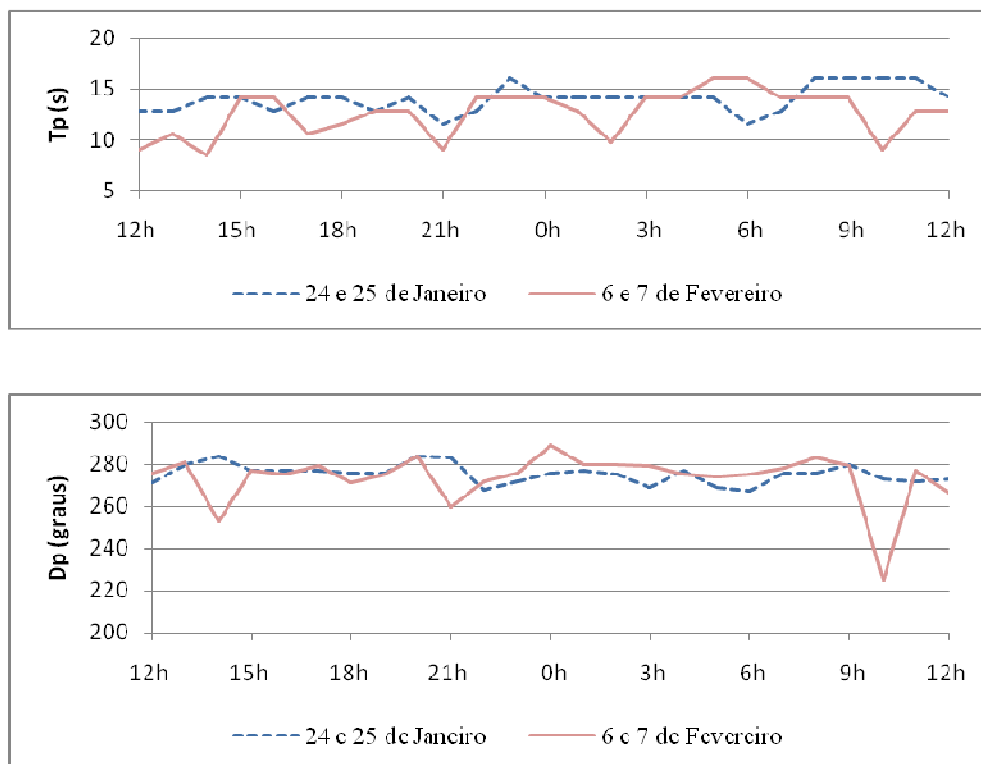


Figura 18 - Dados da altura significativa ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ) e direcção média para a frequência de pico ( $D_p$ ) estimados pelo ADCP para os períodos em análise.

No mês de Janeiro observa-se uma predominância de W. Por outro lado, no mês de Fevereiro verifica-se uma maior variabilidade em torno desta mesma direcção, chegando a registar-se no dia 7 de Fevereiro uma proveniência de SW.

### 4.3 CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO DO MODELO SWAN

#### 4.3.1 DOMÍNIO DE CÁLCULO

O domínio de cálculo foi discretizado num sistema de coordenadas cartesianas através de três malhas regulares com diferentes resoluções (Figura 19). A batimetria (Figura 15 e 17) foi cedida pelo Instituto Hidrográfico. Esta era constituída por sondagens com espaçamento irregular na ordem dos 950 – 1000 m. Deste modo, construíram-se malhas regulares com unidades quadrangulares na mesma ordem de grandeza das originais, sendo as subsequentes malhas definidas por resoluções com metade dos valores das anteriores. Todas elas foram definidas em coordenadas rectangulares militares relativamente ao Datum de Lisboa (origem do sistema de coordenadas local).

Foram adoptados dois tipos de acoplamento com três e dois domínios.

O primeiro tipo (Figura 19) tem um domínio maior com origem  $X_{o1} = 45000$  m e  $Y_{o1} = 25000$  m e apresenta uma extensão de 100 km perpendicular à linha da costa e de 190 km paralelo a esta, com uma resolução  $\Delta x$  e  $\Delta y$  de 1000 m. O segundo domínio tem origem  $X_{o2} = Y_{o2} = 82000$  m e exibe dimensões de 63x95 (km) com  $\Delta x = \Delta y = 500$  m. Finalmente, o terceiro é definido pela origem  $X_{o3} = Y_{o3} = 124000$  m e possui as dimensões de 21 km por 29 km com unidades quadrangulares de 250 m de lado.

O segundo tipo (Figura 20) apresenta um domínio maior com resolução de 500x500 (m) com origem no ponto (102100, 88300) m e em que o segundo domínio encaixado corresponde ao domínio mais pequeno do tipo anterior (DC3).

Apesar de os domínios terem sido acoplados, os cálculos estenderam-se a toda a área de cada domínio. Inicialmente, o modelo procede aos cálculos no primeiro domínio e os resultados deste são utilizados como condição de fronteira no segundo. No caso particular do primeiro tipo de acoplamento, após a resolução do segundo domínio, transferem-se como condição de fronteira os resultados para o terceiro, executando-se novamente o SWAN para determinar a agitação marítima na zona adjacente à praia de Pinheiro da Cruz. Verifica-se que a precisão dos resultados obtidos é maior quando se recorre ao sistema de malhas encaixadas, entre outras razões, por deixar de ser relevante a inexistência de condições de fronteira nas zonas laterais do domínio maior (Pires Silva et al., 2000).

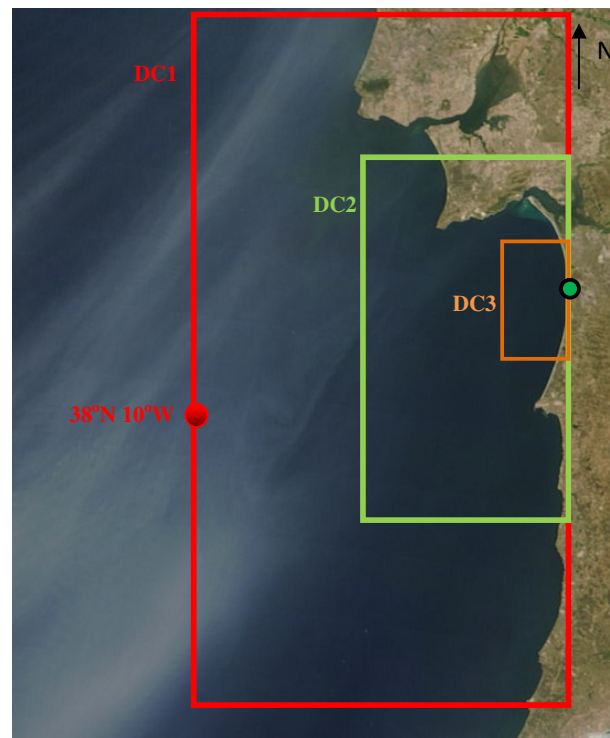


Figura 19 - Domínios computacionais do tipo 1 da zona adjacente a Pinheiro da Cruz. Foto NASA adaptada.

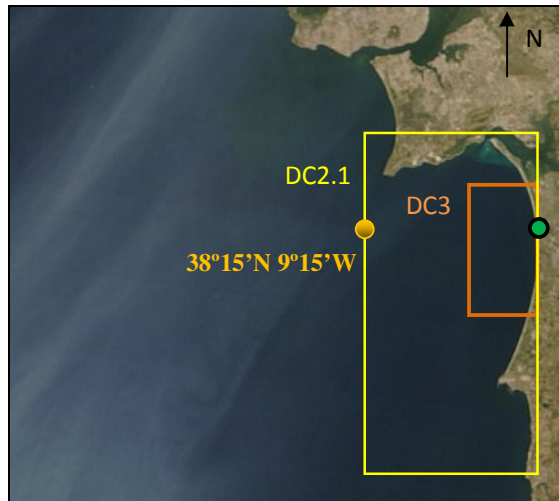


Figura 20 - Domínios computacionais do tipo 2 da zona adjacente a Pinheiro da Cruz. Foto NASA adaptada.

De seguida é apresentado um resumo (Tabela 5) com as características de cada domínio.

Tabela 5 Dimensão e resolução de cada domínio computacional definido.

Domínios	DC1	DC2	DC2.1	DC3
Origem (km)	(45, 25)	(82, 82)	(102.1, 88.3)	(124, 124)
Dimensões (km)	100x190	63x95	42.7x88	21x29
Resolução (m)	1000	500	500	250
Nº de pontos da malha	21534	26400	15664	12350

Relativamente ao espaço espectral foi definida uma resolução direccional de  $\Delta\theta = 4^\circ$  (valor aconselhado pelo manual do SWAN aquando a presença de *swell*), cobrindo os  $360^\circ$  em direcção, e um  $\Delta f = 0.003$  Hz.

#### 4.3.2 CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

A definição das condições de fronteira diz respeito à agitação que está presente na fronteira externa de Oeste dos diferentes tipos de acoplamento. Para o tipo 1, foi adoptado o ficheiro constituído pelos parâmetros integrais do PCM. Para o tipo 2, foi possível utilizar parâmetros integrais e espectros.

Como referido no ponto 4.2, as condições de fronteira são preponderantes para a aplicação do modelo SWAN. Assim, e para uma mais fácil compreensão, resumem-se de seguida, os ficheiros introduzidos, para os distintos episódios (Tabela 6, 7 e 8).

Tabela 6 - Valores utilizados para o forçamento da fronteira Oeste do domínio, nos dias 24 e 25 de Janeiro de 2001

AnoMêsDia.Hora	Hs (m)	Tp (s)	$\theta$ (graus)	$\sigma_{\theta}$ (graus)
20010124.12	6.94	17.99	290.42	13.54
20010124.15	6.82	17.99	290.45	13.54
20010124.18	7.05	17.99	285.93	13.45
20010124.21	7.32	17.99	283.10	13.45
20010125.00	7.27	16.35	286.30	6.320
20010125.03	7.15	16.35	289.10	6.320
20010125.06	6.94	16.35	287.98	11.91
20010125.09	6.73	16.35	290.26	11.91
20010125.12	6.76	16.35	292.55	10.85

Tabela 7 - Valores utilizados para o forçamento da fronteira Oeste do domínio, nos dias 6 e 7 de Fevereiro de 2001

AnoMêsDia.Hora	Hs (m)	Tp (s)	$\theta$ (graus)	$\sigma_{\theta}$ (graus)
20010206.12	8.76	17.99	267.13	11.65
20010206.15	9.18	17.99	263.65	11.65
20010206.18	8.54	17.99	274.51	11.72
20010206.21	8.26	17.99	280.58	11.72
20010207.00	8.27	17.99	282.16	7.25
20010207.03	8.29	17.99	283.98	7.25
20010207.06	8.38	17.99	285.97	14.43
20010207.09	8.64	17.99	285.79	14.43
20010207.12	9.10	17.99	281.95	15.13

Tabela 8 - Valores utilizados para o forçamento da fronteira Oeste do domínio no ponto 38°15'N 9°15'W nos dias 24 e 25 de Janeiro de 2001

AnoMêsDia.Hora	Hs (m)	T <sub>m01</sub> (s)	$\theta$ (graus)	$\sigma_{\theta}$ (graus)
20010124.12	6.52	11.75	288	18.59
20010124.15	6.42	11.39	288	18.42
20010124.18	6.46	10.35	285	18.87
20010124.21	6.59	9.85	282	16.67
20010125.00	6.61	10.45	284	17.56
20010125.03	6.58	10.87	286	17.42
20010125.06	6.5	10.56	287	17.1
20010125.09	6.34	10.29	287	16.34
20010125.12	6.2	10.17	288	15.95

### 4.3.3 CARACTERÍSTICAS DAS SIMULAÇÕES

As formulações para cada um dos processos, com exceção do atrito de fundo, foram as formulações padrão do SWAN. O coeficiente da formulação de JONSWAP para o atrito de fundo, em condições de *swell*, assume o valor de  $0.038\text{m}^2\text{s}^{-3}$ , enquanto que para condições de



*wind sea* o valor é de  $0.067 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ . O modelo utiliza preferencialmente a formulação para o atrito de fundo, para condições de *wind sea*, pelo que foi necessário modificar este coeficiente.

O nível de maré foi considerado de 2 m e constante ao longo do domínio de cálculo.

De modo a verificar o desempenho do modelo sob distintas condições são feitas análises de sensibilidade para diferentes casos. Para o acoplamento do tipo 1, foram realizadas quatro (1 a 4) simulações para os dias de Janeiro e duas (5 e 6) para Fevereiro:

1. Sem ventos;
2. Com ventos com resolução de 5.6 km em todos os domínios de cálculo em regime não estacionário;
3. Com ventos com resolução de 5.6 km no domínio maior em regime não estacionário e nos domínios menores em regime estacionário;
4. Com ventos com resolução de 12.6 km no domínio maior em regime não estacionário e nos domínios menores em regime estacionário;
5. Sem ventos;
6. Com ventos com resolução de 5.6 km no domínio maior em regime não estacionário e nos domínios menores em regime estacionário.

Para o acoplamento do tipo 2, efectuaram-se duas simulações para o período de Janeiro:

- 7 Com forçamento de um ficheiro com espectro 2D;
- 8 Com forçamento de um ficheiro com parâmetros integrais.

No Anexo C.2 podem-se visualizar os distintos ficheiros de entrada a introduzir no modelo.

É importante ainda referir, que para os domínios menores, DC2, DC2.1 e DC3, usou-se a simulação em modo estacionário e sem ventos para obter as condições iniciais do campo de ondas. Deste modo evita-se um “*cold start*” e o SWAN inicia então os cálculos com as condições de fronteira apropriadas.

Rogers et al, (2007) expõem os aspectos relevantes a ter em conta na consideração de estacionariedade ou não estacionariedade na caracterização da agitação marítima “(...) *Use of stationary assumption for a large computational region can lead to poor timing of swell arrivals and temporal description of local growth and decay. Use of nonstationary computations for small regions is computationally wasteful.*(...)”. A consideração do modo estacionário é razoável desde que se esteja perante um domínio de dimensões relativamente pequenas “(...), *if the cross-domain wave propagation occurs at a faster rate than the change in offshore forcing at the domain’s boundary. Furthermore, for these smaller areas, wave growth internal do the domain is fetch-limited, so the stationary model can represent wave growth faithfull.* (...)”.

Partindo desta experiência, e para efeitos de comparação e análise de sensibilidades, realizaram-se simulações no modo estacionário (onde o campo de ventos não é considerado) e

no modo não estacionário. Para este último, foram executadas duas aplicações diferentes: modo não estacionário somente no domínio maior e modo não estacionário para todos os domínios.

Tendo em conta que o domínio maior, para o acoplamento do tipo 1, apresenta dimensões e uma resolução relativamente elevadas, a consideração do modo não estacionário representa a melhor opção, mesmo que seja temporalmente dispendioso a nível da execução dos cálculos. Com uma resolução de 1000 m, o passo temporal considerado é de 5 min de modo a obter uma maior precisão. No outro tipo de acoplamento, a dimensão da célula de cálculo é de 500 m x 500 m e o passo temporal é de 2.5 min.

De seguida apresentam-se duas tabelas que resumem os fenómenos físicos introduzidos nos domínios computacionais (Tabela 9) e as oito diferentes simulações feitas (Tabela 10 a 12) na aplicação do modelo SWAN na praia de Pinheiro da Cruz para os períodos referidos.

Tabela 9 - Fenómenos físicos impostos para cada domínio computacional

Fenómenos	DC1 e DC2.1	DC2	DC3
“Whitecapping”	X		
Rebentação induzida pelo fundo	X	X	X
Interacções a quatro ondas	X		
Interacções a três ondas	X	X	X
Atrito de fundo	X	X	X

Tabela 10 - Resumo das simulações realizadas na aplicação do SWAN, para o período de Janeiro, para o acoplamento do tipo 1.

	Simulação 1			Simulação 2			Simulação 3			Simulação 4			
	DC1	DC2	DC3	DC1	DC2	DC3	DC1	DC2	DC3	DC1	DC2	DC3	
Resolução ALADIN 5.6 km				X	X	X	X						Não estacionário
Resolução ALADIN 12.7 km										X			
Sem ventos	X	X	X					X	X		X	X	Estacionário

Tabela 11 - Resumo das simulações realizadas na aplicação do SWAN, para o período de Fevereiro, para o acoplamento do tipo 1.

	Simulação 5			Simulação 6			
	DC1	DC2	DC3	DC1	DC2	DC3	
Resolução ALADIN 5.6 km				X			Não estacionário
Sem ventos	X	X	X				Estacionário

Tabela 12 - Simulações realizadas, para Janeiro, para o acoplamento do tipo 2.

	Simulação7		Simulação8	
	DC2.1	DC3	DC2.1	DC3
Parâmetros integrais			X	
Espectro 2D	X			

## 4.4 COMPARAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.4.1 PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

As estatísticas utilizadas para avaliar o comportamento do SWAN foram as seguintes: valor médio do erro - ME (*Mean Error*), valor médio quadrático do erro - RMSE (*Root Mean Square Error*) e SI (*Scatter Index*). Apresentam-se de seguida as respectivas definições.

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta X_i \quad (4.2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta X_i)^2} \quad (4.3)$$

$$SI = \frac{RMSE}{\overline{X_o}} \quad (4.4)$$

em que  $N$  é a dimensão da amostra,  $\Delta X = X_c - X_o$  é a diferença entre os parâmetros integrais calculados pelo SWAN e os estimados a partir de observações no ADCP e  $\overline{X_o}$  é o valor médio das observações.

Estas estatísticas foram calculadas de 3 em 3 horas, com início as 15 UTC do dia 24 de Janeiro e 6 de Fevereiro e fim às 12 UTC do dia 25 de Janeiro e 7 de Fevereiro.

A aplicação das estatísticas acima introduzidas sai prejudicada pela dimensão reduzida da amostra. Com efeito, por razões de duração das simulações (elevado número de pontos de cálculo), houve necessidade de limitar as comparações a este período, o que conduz a  $N = 8$ . Assim, as considerações que a seguir se apresentam em relação às várias simulações devem ser enquadradas pela variabilidade que afecta o valor das estatísticas.

### 4.4.2 SIMULAÇÕES PARA O ACOPLAMENTO DO TIPO 1

A Tabela 13 resume o valor das estatísticas adoptadas para as diferentes simulações realizadas no período de Janeiro.

Tabela 13 - Estatísticas comparativas dos parâmetros de agitação marítima, para o episódio de 24 e 25 de Janeiro, para o acoplamento do tipo 1.

	Hs			Tp			Dp	
	RMSE (m)	ME (m)	SI	RMSE (s)	ME (s)	SI	RMSE (graus)	ME
<b>Simulação 1</b>	1.24	1.13	0.40	2.99	2.65	0.22	6.21	-1.63
<b>Simulação 2</b>	1.99	1.15	0.65	1.73	0.88	0.12	5.02	-2.38
<b>Simulação 3</b>	1.43	1.37	0.46	2.99	2.65	0.22	6.05	-3.13
<b>Simulação 4</b>	1.45	1.39	0.47	2.99	2.65	0.22	6.29	-2.63

Apesar de alguns valores elevados do RMSE, constata-se que os valores de SI são relativamente pequenos e dentro da gama de variação de outros estudos já realizados.

As simulações 3 e 4 mostram o efeito da resolução do campo de ventos. Como se pode verificar, a resolução não afecta significativamente os resultados do modelo SWAN. O facto de se estar perante um episódio caracterizado por tempestades severas, com ondas geradas no Atlântico Norte, resulta num caso de forte ondulação. Deste modo, sendo o *swell* preponderante, as ondas geradas pelo vento local, que poderiam ser mais sensíveis às diferentes resoluções utilizadas, perdem importância relativa. Estas considerações são reforçadas pela Figura 21 que mostra que as melhorias associadas à maior resolução são marginais.

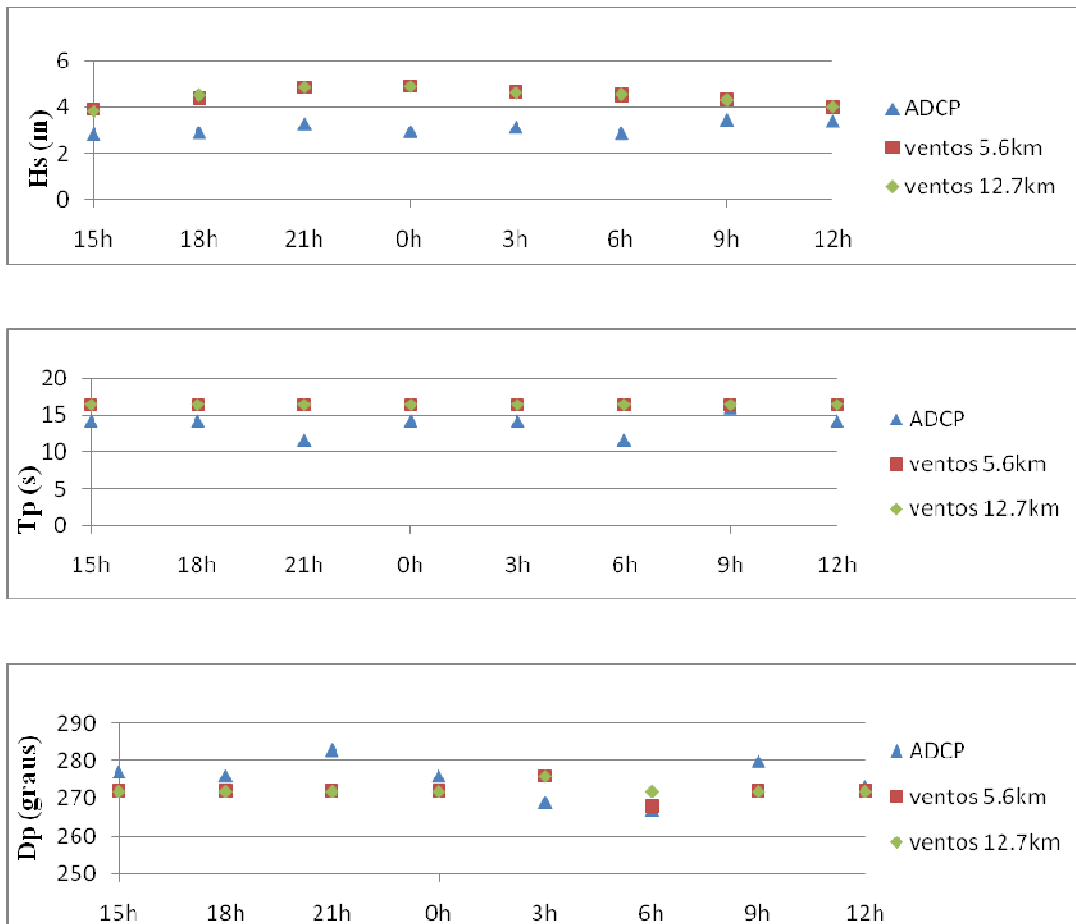


Figura 21 - Comparação entre os dados observados no ADCP e os resultados obtidos no SWAN para as duas resoluções do campo de ventos para o episódio de Janeiro.

Na Tabela 14 apresentam-se os valores do tempo de cálculo dispendido para cada uma das simulações.

Tabela 14 - Tempo de cálculo dispendido para cada uma das simulações.

Cálculos	Modo	Tempo dispendido no computador por cada simulação
Simulação 1	Estacionário	15min
Simulação 2	Não estacionário em todos os domínios	48h
Simulação 3 e 4	Não estacionário no primeiro domínio	6h

Como se pode verificar, o tempo de cálculo da simulação 2 é o séptuplo do tempo dispendido para a simulação 3 e a precisão medida pelas estatísticas associadas a cada uma das simulações é semelhante. Tal permite inferir que a melhor opção é a aplicação do modo não estacionário no primeiro domínio, sendo os restantes resolvidos em modo estacionário. Para a simulação 1, aplicam-se as considerações feitas relativamente à preponderância do *swell*. Isto é, apesar de se verificar que os erros são semelhantes aos obtidos na simulação 3 e o tempo dispendido é muito menor, não se pode concluir que se possa dispensar o regime não estacionário.

Os resultados obtidos para a simulação 3, são de seguida apresentados, nomeadamente o campo de variação de  $H_s$  com respectiva escala e vectores (Figura 22) e os espectros direccionais de variância (Figura 23 e 24).

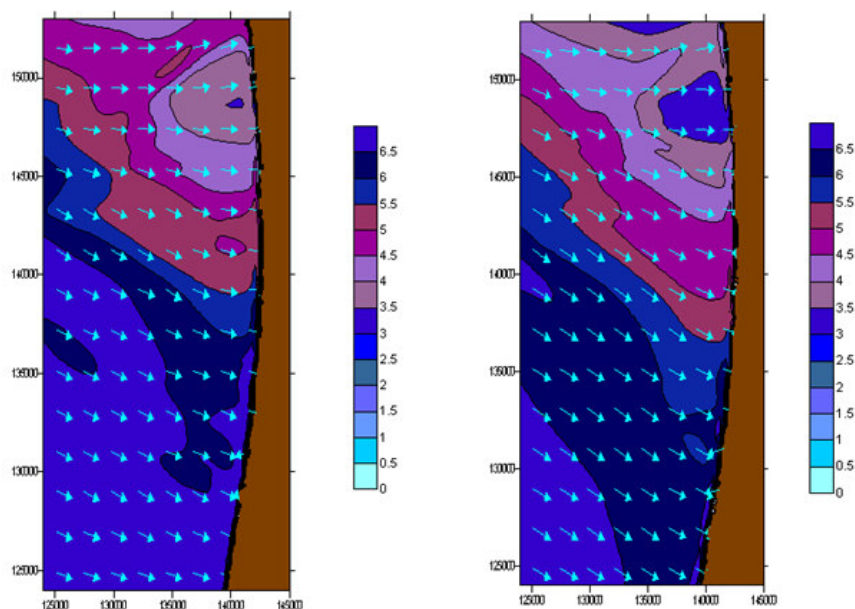


Figura 22 - Campo de variação de  $H_s$  com respectiva escala e vectores que mostram a direcção da ondulação para 24/01/01 as 18 UTC (à esquerda) e para 25/01/01 às 12 UTC (à direita).

A Figura 22 apresenta uma pequena mudança de direcção (os vectores referem-se à direcção média para a frequência de pico) do campo de ondas para Oeste, devido ao fenómeno de refacção induzido pela diminuição de profundidade.

De seguida são apresentados os espectros direccionais de variância (Figura 23 e 24) correspondentes também à simulação 3, representando a direcção de onde as ondas vêm.

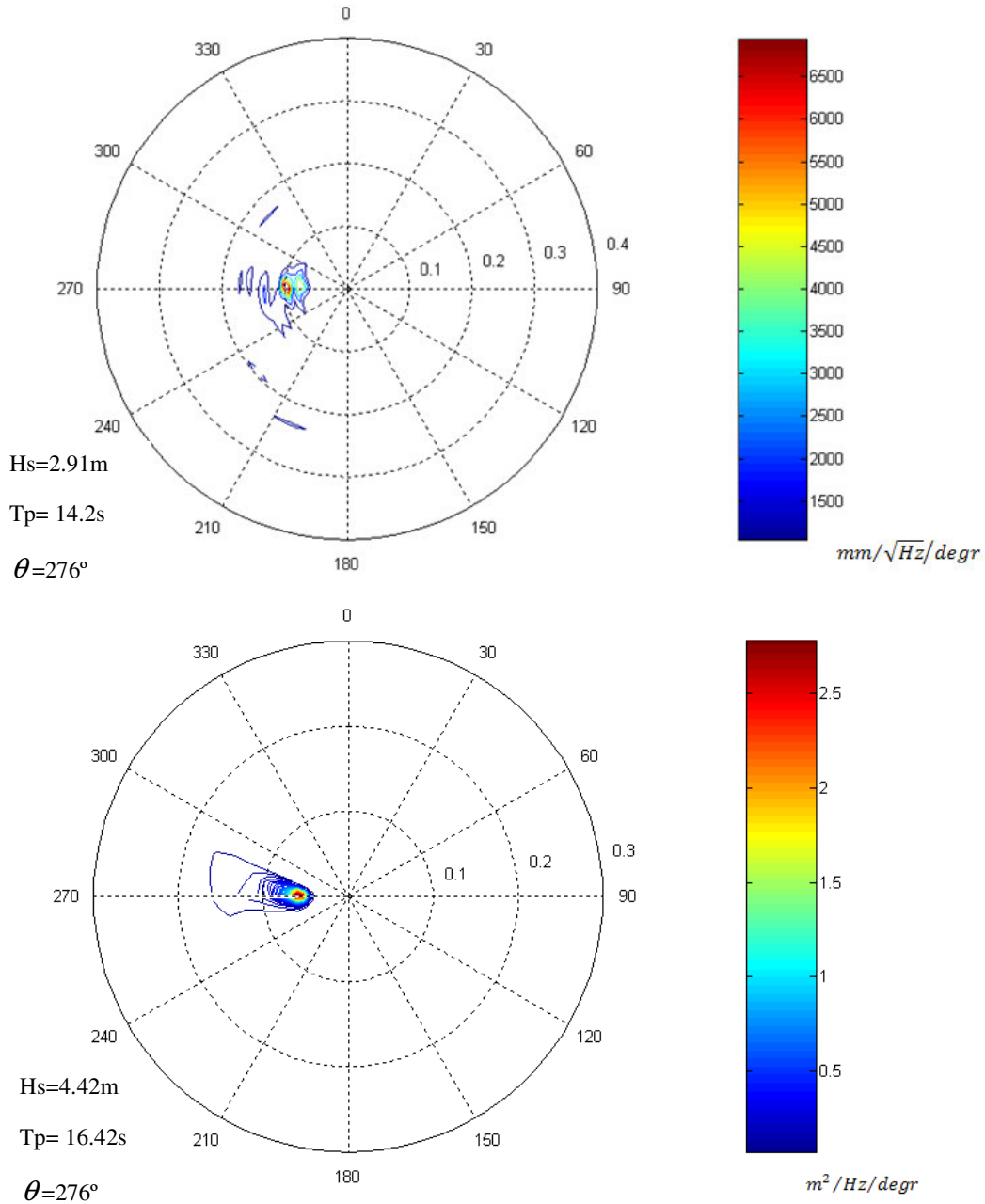


Figura 23 - Comparação do espectro direccional de variância entre o obtido pelo ADCP (em cima) e pelo SWAN (em baixo) para 24/01/01 às 18 UTC.

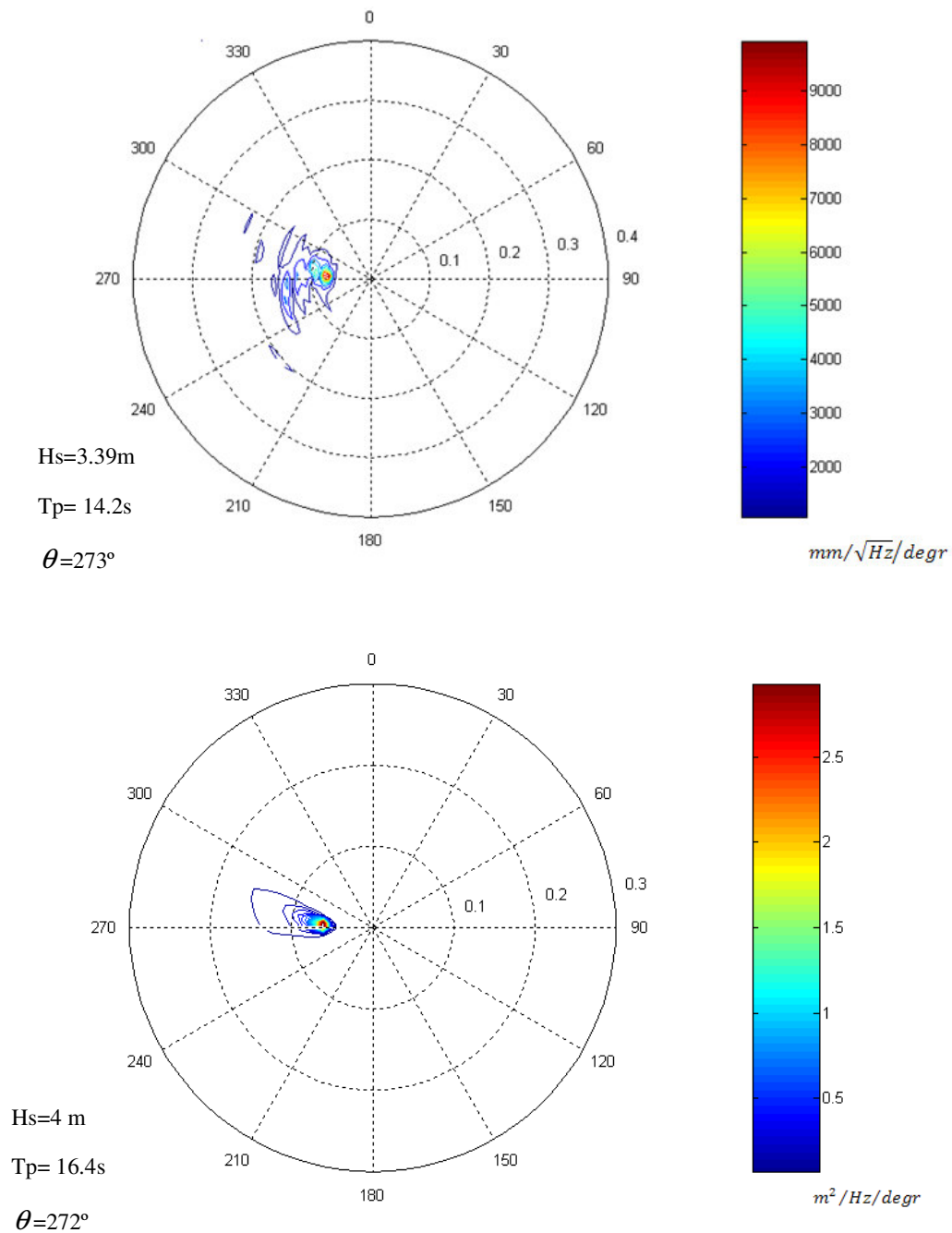


Figura 24 - Comparação do espectro direccional de variância entre o obtido pelo ADCP (em cima) e pelo SWAN (em baixo) para 25/01/01 às 12 UTC.

Como se pode verificar pelas Figuras 23 e 24, o valor da altura significativa difere aproximadamente de 0.6 metros. Quanto à direcção média para a frequência de pico, observa-se que o valor é bem estimado assim como o valor para o período de pico.

Observa-se também pelas figuras apresentadas que a dispersão exibida pelo modelo é menor, levando a que as direcções de sudoeste não sejam bem representadas.

Como referido, ao forçar o modelo com valores paramétricos foi necessário calcular os valores da dispersão para cada instante. Recorreu-se aos espectros fornecidos pelo Instituto de Meteorologia, obtendo-se valores de dispersão relativamente baixos. Verifica-se que o espectro direccional de variância obtido pelo SWAN não representa bem a dispersão observada pelo ADCP.

A Figura 25 dá conta da relação entre os valores da altura significativa calculados e os estimados, para os dias de Janeiro, verificando-se uma sobrestimação por parte do modelo.

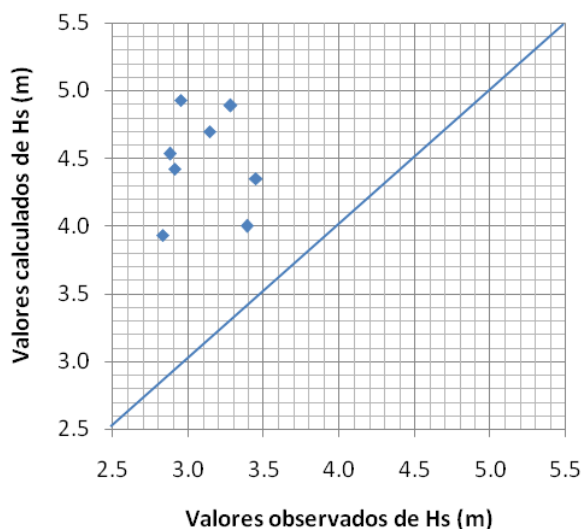


Figura 25 - Comparação da altura significativa, para o período do mês de Janeiro, entre os valores medidos pelo ADCP e os valores calculados pelo SWAN.

As estatísticas relativa à resolução 5.6 km mostraram uma melhor concordância. Por esta razão, adoptou-se esta resolução para as simulações do mês de Fevereiro. Na Tabela 15 são apresentadas as estatísticas comparativas, para as simulações 5 e 6.

Tabela 15 - Estatísticas comparativas dos parâmetros de agitação marítima, para o episódio de 6 e 7 de Fevereiro, para o acoplamento do tipo 1.

	Hs			Tp			Dp	
	RMSE (m)	ME (m)	SI	RMSE (s)	ME (s)	SI	RMSE (graus)	ME
<b>Simulação 5</b>	2.80	2.63	0.83	4.43	3.76	0.33	9.50	-4.5
<b>Simulação 6</b>	2.90	2.76	0.86	4.43	3.76	0.33	8.96	-5

De modo análogo ao sucedido no mês de Janeiro, não há diferenças significativas em relação à escolha do regime estacionário ou não estacionário.



De seguida são apresentados dois exemplos de espectros direccionais de variância (Figura 26 e 27) para o mês de Fevereiro.

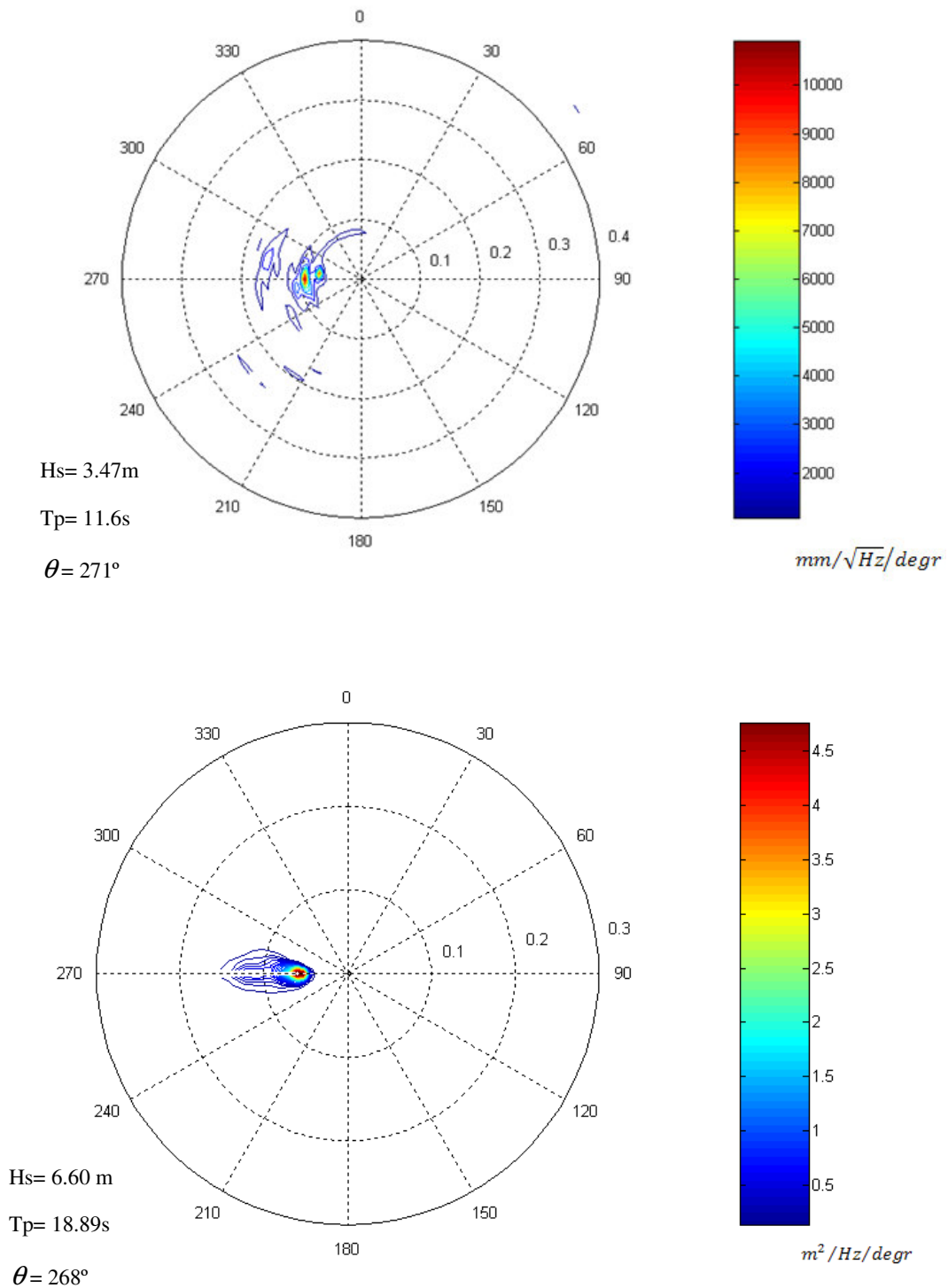


Figura 26 - Comparação do espectro direccional de variância entre o obtido pelo ADCP (em cima) e pelo SWAN (em baixo) para 6/02/01 às 18 UTC.

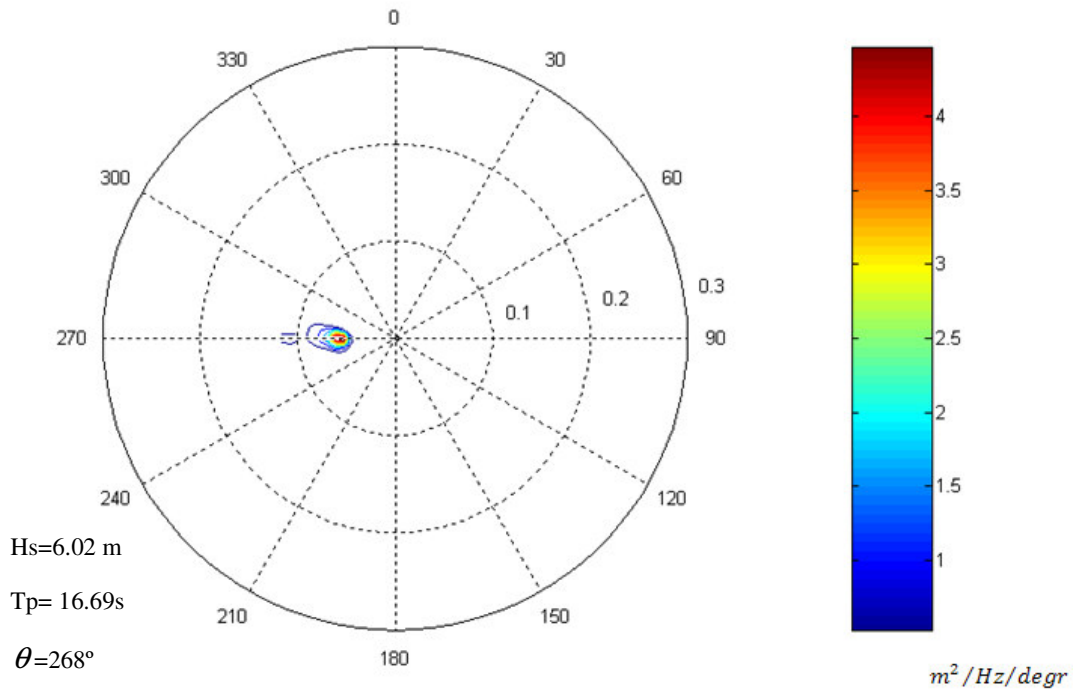
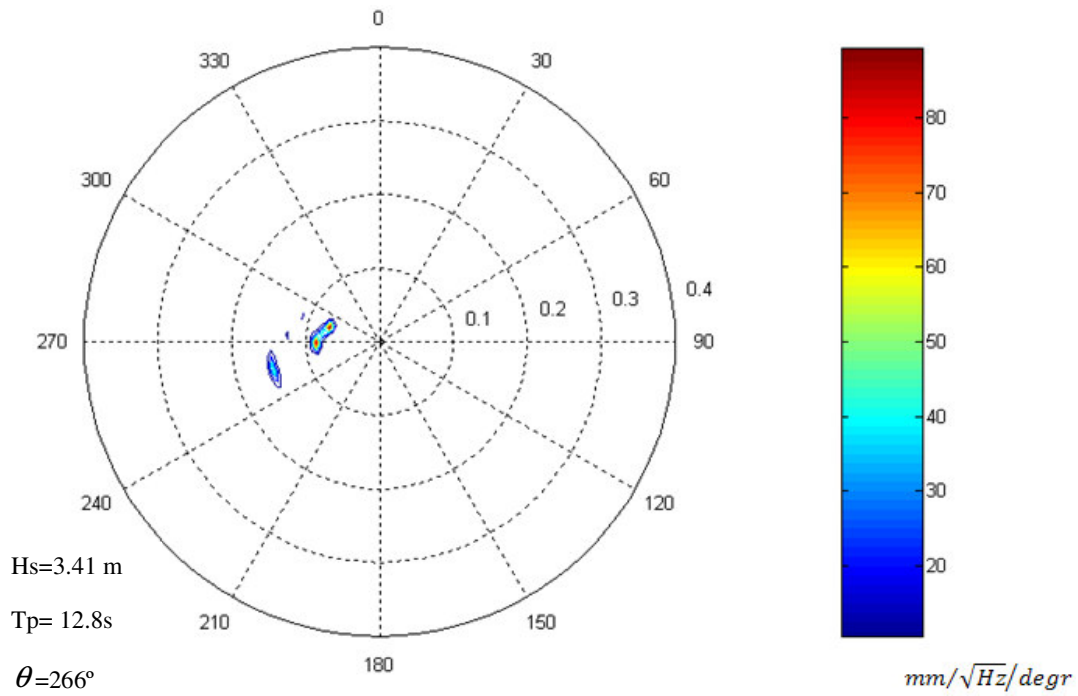


Figura 27 - Comparação do espectro direccional de variância entre o obtido pelo ADCP (em cima) e pelo SWAN (em baixo) para 7/02/01 às 12UTC.

Observando as Figuras 27 e 28 acima apresentadas, depara-se com uma elevada diferença no valor da altura significativa e no período de pico. Já a direcção média para a frequência de pico é bem estimada.

Na Figura 28 constata-se uma sobrestimação ainda mais notória para os dias de Fevereiro da altura significativa.

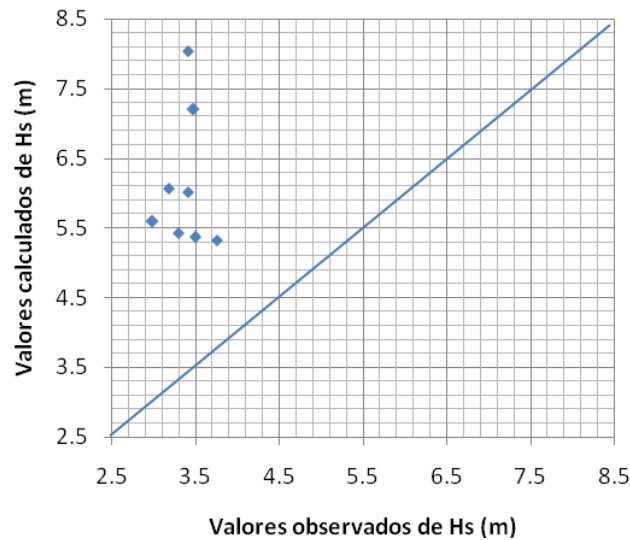


Figura 28 - Comparação da altura significativa, para o período do mês de Fevereiro, entre os valores medidos pelo ADCP e os valores calculados pelo SWAN.

O modelo SWAN foi testado para situações extremas, devido à forte tempestade ocorrida neste período. Em Fevereiro, as alturas significativas são bastante maiores que no mês de Janeiro. A este propósito, Rogers et al. (2007) referem que o RMSE tende a ser mais elevado em mar forte. No entanto, denota-se que o SI, apesar de ser um pouco elevado, ainda se encontra num intervalo de valores razoáveis.

#### 4.4.3 SIMULAÇÕES PARA O ACOPLAMENTO DO TIPO 2

O presente ponto tem como objectivo comparar simulações do SWAN forçado por um estado de mar definido por parâmetros integrais e um estado de mar definido pelo espectro direccional de variância.

Para tal, como referido, foi necessário reduzir o domínio maior, já que as informações existentes, relativas ao espectro 2D, só estavam disponíveis no ponto 38.25°N 9.25°W e tinham como origem o Programa de Clima Marítimo. Realizaram-se os cálculos para o período do mês de Janeiro com um campo de ventos com resolução 5.6 km e os resultados podem ser observados na Tabela 16.

Tabela 16 - Estatísticas comparativas dos parâmetros de agitação marítima, para o episódio de 24 e 25 de Janeiro, para o acoplamento do tipo 2.

	Hs			Tp			Dp	
	RMSE (m)	ME (m)	SI	RMSE (s)	ME (s)	SI	RMSE (graus)	ME
Simulação 7	1.24	-1.21	0.43	3.57	1.95	0.30	3.69	-0.88
Simulação 8	1.16	1.9	0.37	3.39	-2.03	0.25	6.83	-2.63

Constata-se que o forçamento na fronteira com o espectro 2D produz melhores resultados a nível da direcção média para a frequência de pico do que com o forçamento com parâmetros integrais. Já o mesmo não se verifica para os valores da altura significativa e do período de pico.

Os espectros direccionais de variância obtidos para 24/01/01 às 18 UTC,, para as simulações 7 e 8, respectivamente, são exibidos nas Figura 30 e 31 e comparados com os espectros 2D alcançados através das medições do ADCP (Figura 29).

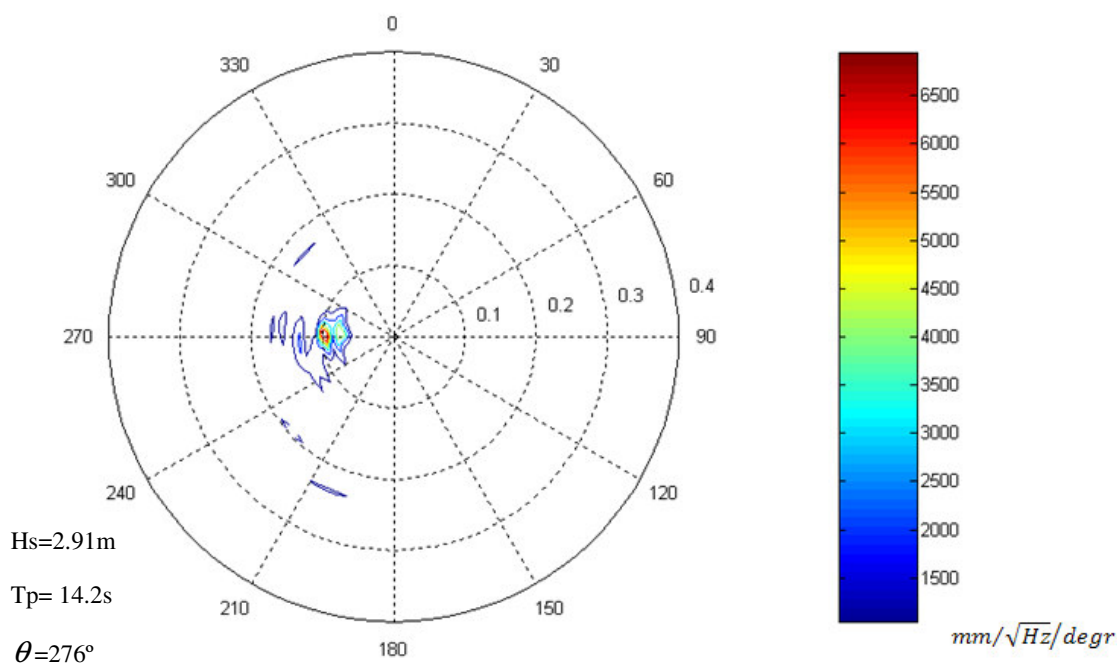


Figura 29 - Espectro direccional de variância, para 24/01/01 às 18 UTC, medido pelo ADCP.

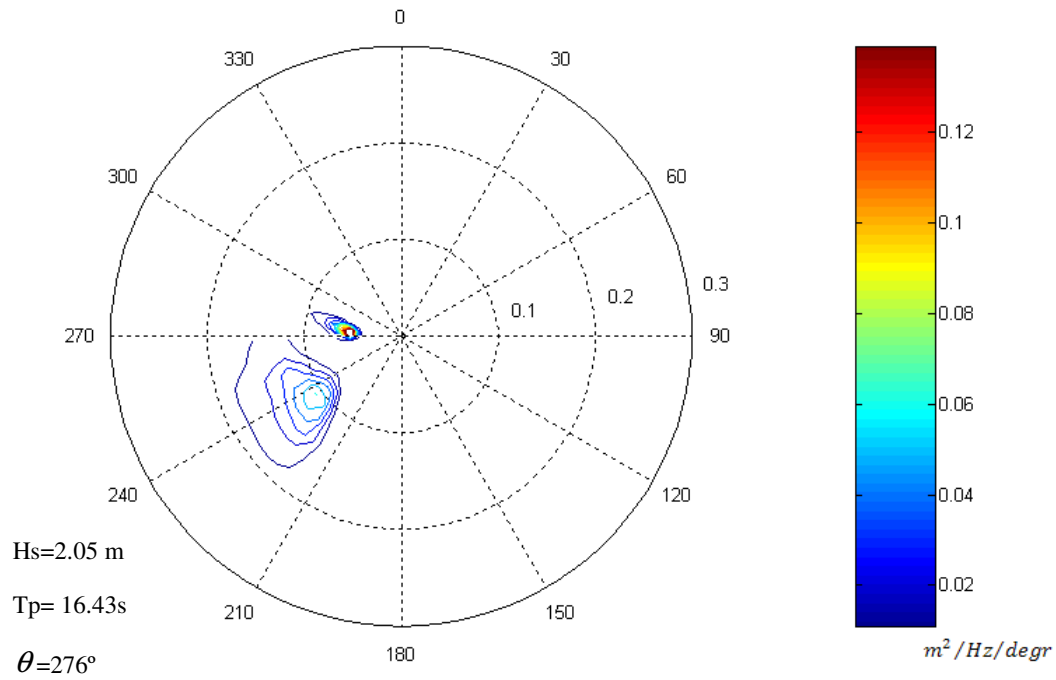


Figura 30 - Espectro direccional de variância, para 24/01/01 às 18 UTC, com forçamento do ficheiro constituído por espectro direccional de variância.

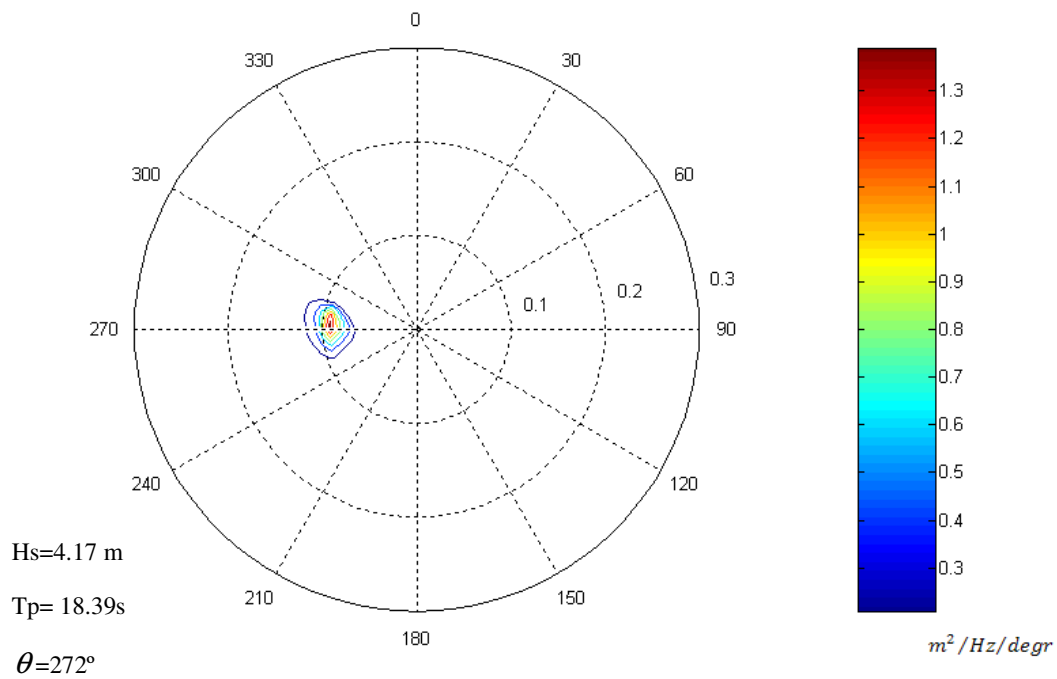


Figura 31 - Espectro direccional de variância, para 24/01/01 às 18 UTC, com forçamento do ficheiro constituído por parâmetros integrais.

Já para o dia 25/01/01 às 12 UTC os espectros direccionais de variância obtidos, também para as simulações 7 (Figura 33) e 8 (Figura 34) são apresentados e comparados com os espectros 2D alcançados através das medições do ADCP (Figura 32).

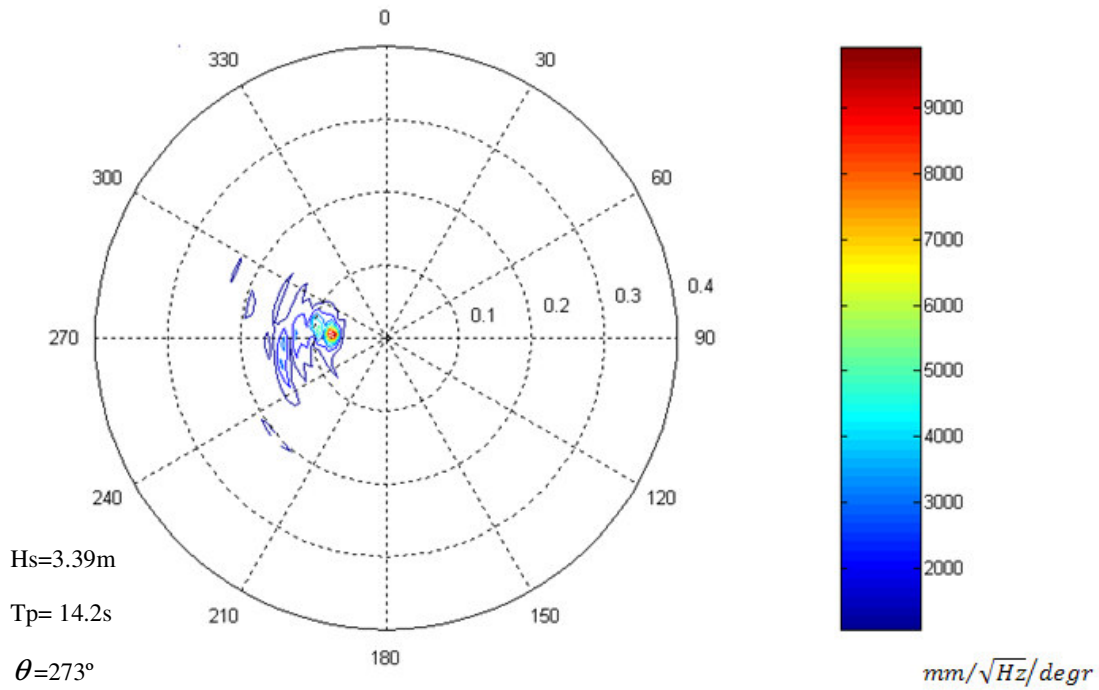


Figura 32 - Espectro direccional de variância, para 25/01/01 às 12 UTC, medido pelo ADCP

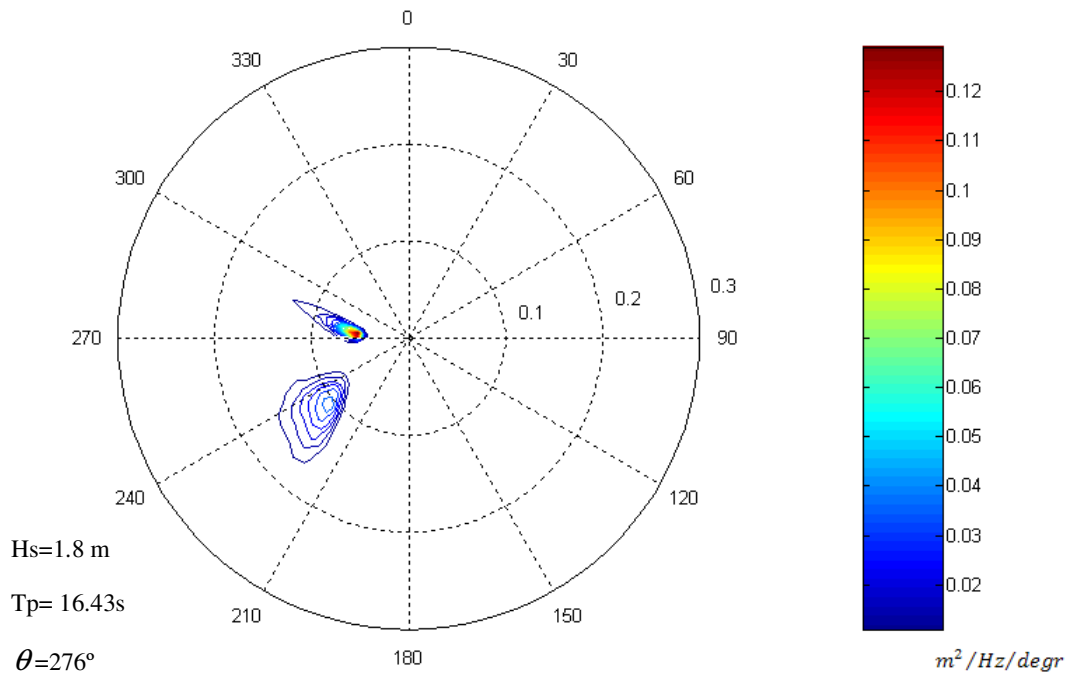


Figura 33 - Espectro direccional de variância, para 25/01/01 às 12 UTC, com forçamento do ficheiro constituído por espectro direccional de variância.

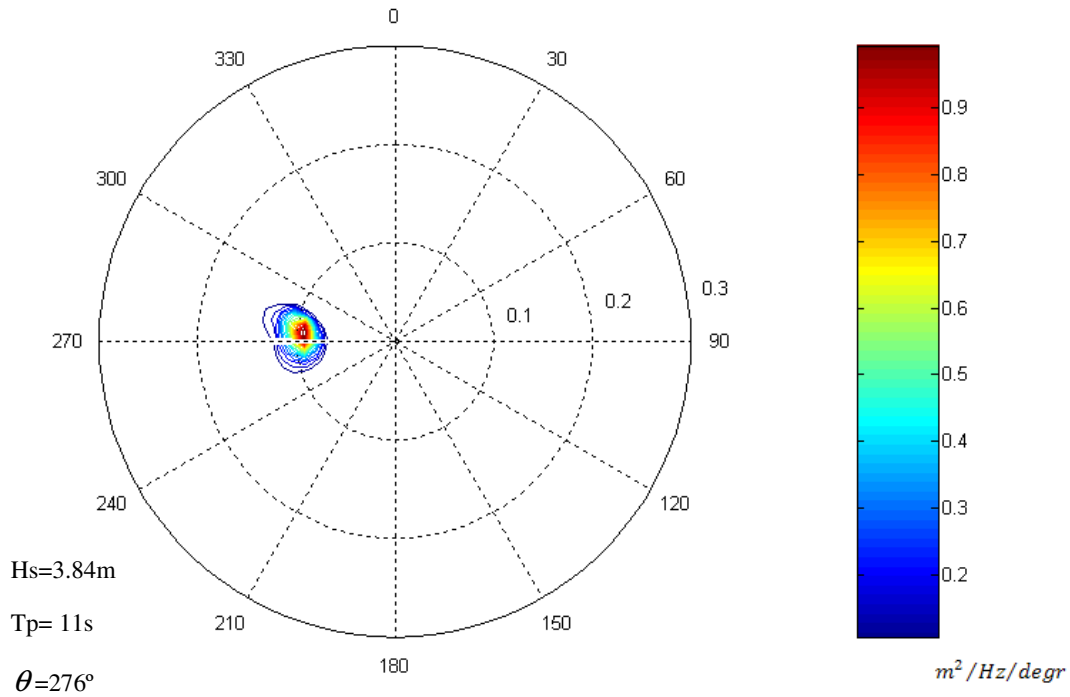


Figura 34 - Espectro direccional de variância, para 25/01/01 às 12 UTC, com forçamento do ficheiro constituído por parâmetros integrais.

As Figuras 29 a 34 reforçam as conclusões acima enunciadas relativamente a este tipo de acoplamento, em particular no âmbito da estima das direcções.

Em Pires Silva et. al (2002) foi feito um estudo onde se compararam dois tipos de forçamento na fronteira: um com medições realizadas por uma bóia ao largo do porto de Sines e outro pelas simulações efectuadas pelo WAM. Deste estudo, concluiu-se que se alcançam melhores resultados com a primeira hipótese do que com a segunda.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como principal objectivo a aplicação e análise do desempenho do modelo SWAN, na zona adjacente a Pinheiro da Cruz, especialmente considerando o regime não estacionário. Tal significou forçar o SWAN com um campo de ventos variável e impor na fronteira condições dependentes do tempo.

Ora, para que a aplicação de um regime não estacionário tenha sentido é necessário recorrer a um domínio de cálculo de grandes dimensões. Caso contrário, a taxa de variação das condições de forçamento pode ser consideravelmente superior ao tempo de viagem das perturbações no interior do domínio. Mas, domínios de grandes dimensões implicam um número elevado de pontos de cálculo e, conseqüentemente, tempos de computação também elevados. Esta circunstância limitou o período durante o qual foram obtidos os resultados das simulações. De certo modo, esta limitação condicionou a interpretação estatística dos resultados e o alcance das conclusões.

O campo de ventos variável foi obtido através de simulações do programa ALADIN, explorado pelo Instituto de Meteorologia. As condições na fronteira de mar correspondiam a resultados do programa WAM, quer através de uma implementação à escala global no ECMWF quer através da implementação à escala regional do PCM. No primeiro caso, o WAM é forçado por um campo de ventos do modelo atmosférico global do próprio centro europeu. No segundo, recorre-se ao modelo de meso-escala HIRLAM da meteorologia espanhola.

Complementarmente ao objectivo principal acima descrito, pretendia-se aprofundar as capacidades da interface SOPRO. Nomeadamente, salientam-se a introdução de condições de fronteira e campo de ventos variáveis. A nível do pós processamento desenvolveram-se as rotinas necessárias à representação gráfica de espectros direccionais.

A comparação com o ADCP envolveu essencialmente parâmetros integrais e alguns casos seleccionados de espectros direccionais para ilustrar aspectos particulares da simulação. É de sublinhar que os dois episódios de verificação correspondiam a duas situações de tempestade no Atlântico Norte, com forte prevalência de *swell*, constituindo um teste muito exigente ao comportamento do modelo SWAN. As estatísticas de avaliação mostraram, especialmente o SI, que o SWAN em modo não estacionário simula as condições de mar junto à costa com uma precisão que está de acordo com os valores típicos para este tipo de modelos.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Battjes, J.A., 1994, Shallow water wave modelling, *Proc.Int. Symp.: Waves – Physical and Numerical Modeling*, eds. M. Isaacson and M.Quick, Vancouver, University of British Columbia, I, pp. 1-23.

Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen, 1999, A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, *J.Geoph.Research*, 104, C4, 7649-7666.

Carretero, J.C., Alvarez, E., Gomez, M., Perez, B., Rodriguez, I., (2000). Ocean forecasting in narrow shelf seas: application to the Spanish coasts, *Coastal Engineering*, **41**, 269-293.

CEM, 2002, Coastal Engineering Manual, U.S. Army Corps of Engineers,

Eldeberky, Y., 1996: Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone, *Ph.D. thesis*, Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, The Netherlands

Holthuijsen, L.H. Booij, Herbers, T.H.C., 1989, A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow waters with ambient currents, *Coastal Engineering*, **13**, 23-54.

Holthuijsen, Leo H., 2007, *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, Cambridge University Press

Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. and P.A.E.M. Janssen, 1994: *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*, Cambridge University Press, 532 p.

Mulligan, R. P., Bowen, A. J., Hay, A. E., van der Westhuysen, A. J., and Battjes, J. A., 2008: Whitecapping and wave field evolution in a coastal bay, *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, C03008.

Ochi, M. (1998), *Ocean Waves. The Stochastic Approach*, Cambridge University Press.

Pinheiro, L., Santos, J.A., Fortes, C.J.E.M.; Capitão, R. (2007). SOPRO – Pacote integrado de modelos para avaliação dos efeitos das ondas em portos. *Revista da Tecnologia da Água*, Edição I, March (in Portuguese).

Pires Silva, A.A., Makarynsky, O., Monbaliu, J., Ventura Soares, C. e Coelho, E. (2000), Modelling wave transformation in an open beach on the west coast of Portugal, *Proc. COASTAL WAVE MEETING*, A. Sanchez-Arcilla, S.Ponce de Leon (Eds.) Technical University of Catalonia, Barcelona, 4.3.

Pires Silva, A.A., Makarynsky, O., Monbaliu, J., Ventura Soares, C. e Coelho, E. (2002), Wam/Swan Simulations in an Open Coast: Comparisons with ADCP Measurements, *Littoral 2002, The Changing Coast*. EUROCOAST/EUCC, Porto – Portugal.

Ris, R. C., 1997: Spectral modeling of wind waves in coastal areas. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 160 pp.

Rogers, W.E., J.M. Kaihatu, H.A. H. Petit, N. Booij, and L.H. Holthuijsen, 2001: Diffusion reduction in a arbitrary scale third generation wind wave model, *Ocean Engng.*, **29**, 1357-1390.

Rogers, W., P. Hwang, and D. Wang (2002), Investigation of wave growth and decay in the SWAN model: three regional-scale applications, *J. Phys.Oceanogr.*, **33**, 366– 389.

Rogers,W., J. Kaihatu, L. Hsu, R. Jensen, J. Dykes, and K. Holland (2007), Forecasting and hindcasting waves with the SWAN model in the Southern California Bight, *Coastal Eng.*, **54**, 1 –15.

Smith G.D. (1978), *Numerical solution of partial differential equations*, Oxford University Press, Walton Street, Oxford.

Stelling, G.S. and J. J. Leendertse, 1992, Approximation of convective processes by cyclic AOI methods, *Proc.2<sup>nd</sup> Int. Conf. Estuarine and Coastal Modeling* (Tampa), New York, ASCE, pp.771-782

Tucker, M.J. (1991), *Waves in Ocean Engineering. Measurement, analysis, interpretation*, Ellis Horwood Limited.

SWAN Team (2008). “SWAN: Technical Documentation. SWAN Cycle III version 40.51”, Delft University of Technology, versão electrónica em

WAMDI group, 1988: The WAM model - a third generation ocean wave prediction model, *J. Phys. Oceanogr.*, **18**, 1775-1810

<http://www.fluidmechanics.tudelft.nl/swan/index.htm>.

[http://users.coastal.ufl.edu/~sheppard/eoc6430/coastal\\_engineering\\_manual.htm](http://users.coastal.ufl.edu/~sheppard/eoc6430/coastal_engineering_manual.htm)

<http://www.hidrografico.pt>

## 7. ANEXOS

### ANEXO A

#### Métodos numéricos

##### A.1 Esquema BSBT

A discretização da equação de balanço da acção, através do esquema numérico BSBT, para velocidades de propagação positivas é descrita através da seguinte equação (Holthuijsen 2007):

$$\begin{aligned}
 & \left. \frac{N^i - N^{i-1}}{\Delta t} \right|_{i_x, i_y, i_\sigma, i_\theta}^n \\
 & + \left[ \frac{(c_{g,x}N)_{i_x} - (c_{g,x}N)_{i_{x-1}}}{\Delta x} \right]_{i_y, i_\sigma, i_\theta}^{i_t, n} + \left[ \frac{(c_{g,y}N)_{i_y} - (c_{g,y}N)_{i_{y-1}}}{\Delta y} \right]_{i_x, i_\sigma, i_\theta}^{i_t, n} \\
 & + \left[ \frac{(1-\mu)(c_\sigma N)_{i_{\sigma+1}} + 2\mu(c_\sigma N)_{i_\sigma} - (1+\mu)(c_\sigma N)_{i_{\sigma-1}}}{2\Delta\sigma} \right]_{i_x, i_y, i_\theta}^{i_t, n} \\
 & + \left[ \frac{(1-\nu)(c_\theta N)_{i_{\theta+1}} + 2\nu(c_\theta N)_{i_\theta} - (1+\nu)(c_\theta N)_{i_{\theta-1}}}{2\Delta\theta} \right]_{i_x, i_y, i_\sigma}^{i_t, n} = \left[ \frac{S}{\sigma} \right]_{i_x, i_y, i_\sigma, i_\theta}^{i_t, n^*} \quad (A.1)
 \end{aligned}$$

Onde os índices mudos  $i_x, i_y, i_\theta, i_\sigma$  referem-se à localização das variáveis no espaço geográfico e espectral no nível temporal  $n$  com o intervalo de tempo  $\Delta t$  e  $\Delta x, \Delta y, \Delta\theta$  e  $\Delta\sigma$  os respectivos incrementos no espaço.  $n^*$  é igual a  $n$  ou  $n-1$ , dependendo do termo fonte ou sumidouro a discretizar.

Para os parâmetros  $\mu=0$  e  $\nu=0$ , tem-se um esquema implícito de diferenças centradas, sendo que para  $\mu=1$  e  $\nu=1$ , o utilizador opta pelo esquema implícito de diferenças retardadas.

##### A.2 Esquema S&L

De modo a obter resultados consistentes, para cálculos realizados em modo não estacionário, recorre-se ao esquema S&L. Este esquema numérico substitui, relativamente ao esquema BSBT, os dois termos representativos da propagação no espaço geográfico, seguindo estes a seguinte discretização (Holthuijsen, 2007):

$$\begin{aligned}
& \left[ \frac{\frac{5}{6}(c_{g,x}N)_{i_x} - \frac{5}{4}(c_{g,x}N)_{i_{x-1}} + \frac{1}{2}(c_{g,x}N)_{i_{x-2}} - \frac{1}{2}(c_{g,x}N)_{i_{x-3}}}{\Delta x} \right]_{i_y, i_\sigma, i_\theta}^{i_y, n} \\
& + \left[ \frac{\frac{5}{6}(c_{g,y}N)_{i_y} - \frac{5}{4}(c_{g,y}N)_{i_{y-1}} + \frac{1}{2}(c_{g,y}N)_{i_{y-2}} - \frac{1}{2}(c_{g,y}N)_{i_{y-3}}}{\Delta y} \right]_{i_x, i_\sigma, i_\theta}^{i_y, n} \\
& + \left[ \frac{\frac{1}{4}(c_{g,x}N)_{i_{x+1}} - \frac{1}{4}(c_{g,x}N)_{i_{x-1}}}{\Delta x} \right]_{i_y, i_\sigma, i_\theta}^{i_y, n-1} \\
& + \left[ \frac{\frac{1}{4}(c_{g,y}N)_{i_{y+1}} - \frac{1}{4}(c_{g,y}N)_{i_{y-1}}}{\Delta y} \right]_{i_x, i_\sigma, i_\theta}^{i_y, n-1}
\end{aligned} \tag{A.2}$$

### A.3 Esquema SORDUP

Para cálculos em modo estacionário, a obtenção de resultados consistentes, consegue-se através do esquema numérico SORDUP, que analogamente ao esquema S&L, discretiza os termos referentes à propagação no espaço geográfico de uma forma distinta à feita no BSBT.

$$\begin{aligned}
& \left[ \frac{1.5(c_{g,x}N)_{i_x} - 2(c_{g,x}N)_{i_{x-1}} + 0.5(c_{g,x}N)_{i_{x-2}}}{\Delta x} \right]_{i_y, i_\sigma, i_\theta}^{i_y, n} \\
& + \left[ \frac{1.5(c_{g,y}N)_{i_y} - 2(c_{g,y}N)_{i_{y-1}} + 0.5(c_{g,y}N)_{i_{y-2}}}{\Delta y} \right]_{i_x, i_\sigma, i_\theta}^{i_y, n}
\end{aligned} \tag{A.3}$$

## Anexo B

### Cálculos e considerações auxiliares na utilização do modelo SWAN.

#### B.1 Evolução da interface SOPRO

O SOPRO foi a interface utilizada para uma melhor manipulação do modelo SWAN. De modo a satisfazer os objectivos deste trabalho, foi necessário proceder a um melhoramento da interface de modo a ser possível a realização de cálculos em modo não estacionário e a introdução de um ficheiro de dados para forçar condições de fronteira. De seguida, apresenta-se o aspecto da interface no início e no final deste trabalho (Figura B.1)

PROJECTO

Project Identification | Computational Grid | Bathymetry Grid | Spectrum Resolution | Physical Processes | Wave Conditions | Wind Conditions | Output Specifications | Results

Project Identification: 158

Project Name: PinheirodaCruz

Project Description / Comments / Notes

Project Nickname: jdc

Buttons: Load Data, Criar dados SWAN, Correr SWAN, Matriz de Transferência, FECHAR

Project Identification | Computational Grid | Bathymetry Grid | Spectrum Resolution | Physical Processes | Wave Conditions

Stationary Wind Conditions | Non Stationary Wind Conditions | Currents Conditions | Output Specifications | Results

Non Stationary?  Main grid  Nested gid  Nested gid1

Initial Time: Year: 2001, Month: 1, Day: 24, Hour: 12, Minute: 0, Second: 0

Final Time: Year: 2001, Month: 1, Day: 25, Hour: 14, Minute: 0, Second: 0

Delta Time: 1 HR

Read non-stationary wind files' names from this file:

C:\Documents and Settings\Mania\Documents\meus documentos\tese\swanpinheiro\_ventosnotempo\wind.dat

C:\Documents and Settings\Fortes\My Documents\Estagios\Mania Joao Teles\swanpinheiro\_ventosnot

C:\Documents and Settings\Fortes\My Documents\Estagios\Mania Joao Teles\swanpinheiro\_ventosnot

Non-Stationary Computation times

Initial Time: Year: 2001, Month: 1, Day: 24, Hour: 12, Minute: 0, Second: 0

Final Time: Year: 2001, Month: 1, Day: 25, Hour: 12, Minute: 0, Second: 0

Buttons: Load Data, Criar dados SWAN, Correr SWAN, Get Transfer Matrix, CLOSE

Figura B1 - Ilustração da interface SOPRO antes (em cima) e após (em baixo) o presente trabalho.

Como se pode verificar, antes do trabalho realizado, não havia possibilidade, através do SOPRO, do utilizador escolher fazer os cálculos em modo estacionário ou modo não estacionário. Para além deste novo formato, as condições de fronteira já podem, actualmente, ser fornecidas através de ficheiros de entrada, em forma espectral ou paramétrica, com variação temporal.

### B.2 Manipulação dos ficheiros de entrada para forçar condições de fronteira.

Inicialmente, quando se fez a tentativa de forçar as condições de fronteira com os ficheiros de entrada fornecidos pelo Instituto Meteorológico, correspondendo a saídas do modelo WAM, houve a necessidade de mudar o referencial relativamente à leitura dos valores de densidade de variância espectral. O WAM usa a convenção náutica, isto é, as direcções lêem-se a partir de Norte no sentido horário. É necessário ter em atenção o facto de que o WAM apesar de usar esta convenção, as direcções são relativas às direcções para onde as ondas se propagam e para onde o vento sopra. No entanto o SWAN é bastante explícito relativamente ao tipo de convenções utilizadas. O mesmo refere que na convenção náutica as direcções lêem-se a partir de norte, sentido horário. No entanto são direcções relativas à origem das ondas, ou seja donde as mesmas se propagam. Quanto à convenção cartesiana o SWAN admite que as direcções se lêem a partir do eixo positivo Ox, no sentido anti-horário, sendo as direcções referentes ao destino da onda, ou seja, para onde a onda se propaga.

Neste sentido o que respeita ao WAM como convenção náutica (relativamente ao destino das ondas) refere-se ao SWAN como convenção cartesiana. Para além da correspondência relativa às convenções foi necessário modificar os eixos de referência, sofridos de uma rotação de 90° (Figura B.2)

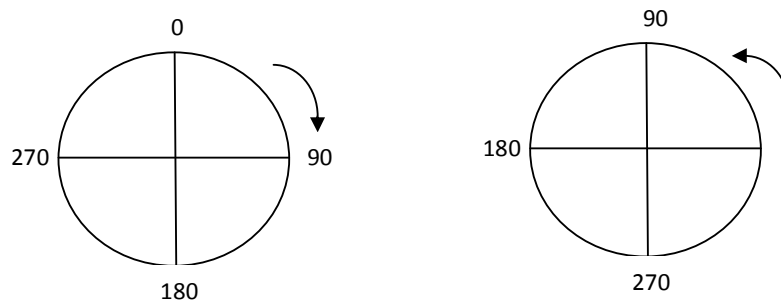


Figura B.2 - Representação das convenções náutica e cartesiana respectivamente.

### Cálculo da dispersão

Para o cálculo de dispersão recorreu-se aos ficheiros fornecidos pelo IM, onde as densidades de variância têm como unidade  $\frac{m^2}{Hz.rad}$ . Por sua vez o SWAN aceita esta unidade, mas no lugar de radiano terá que se reduzir a grau -  $\frac{m^2}{Hz.grau}$ .

Procedeu-se de seguida ao produto dos valores do espectro direccional  $D(\theta)$  por  $[2 \sin(\frac{1}{2}\theta)]^2$  e  $\theta$ , de modo a resolver o integral  $\sigma_\theta^2 = \int_{-\pi}^{+\pi} [2 \sin(\frac{1}{2}\theta)]^2 D(\theta) d\theta$  que possibilita a obtenção do valor de dispersão  $\sigma_\theta$ .

Fez-se o somatório, para cada frequência, da raiz quadrada do resultado anterior. É necessário referir que  $\sigma_\theta$  obtém-se através de uma ponderação feita com o espectro em direcção para cada frequência.

## ANEXO C

### Simulações no modelo SWAN

#### C.1 Diferentes tipos de ficheiros para forçar na fronteira

Foram realizadas diferentes simulações de modo a verificar qual o melhor ficheiro de entrada para proceder às análises de sensibilidade e verificações do modelo SWAN na costa portuguesa. Experimentaram-se diferentes tipos de ficheiros de entrada.

	Cálculo 1	Cálculo 2	Cálculo 3	Cálculo 4	Cálculo 5	Cálculo 6	Cálculo 7
Fronteira	TPAR1	EspectroIM	TPAR1_médio	TPAR1	TPAR1	TPAR	Hs, Tp e $\theta$
Resultados							
Hs	4.22	1.70	3.99	4.18	4.11	4.03	3.71
$\theta$	272	280	272	272	272	272	272
Tp	16.43	5.36	12.42	16.43	16.43	16.43	16.43

Ficheiros de entrada	
TPAR1	<ul style="list-style-type: none"><li>Ficheiro de entrada com parâmetros integrais;</li><li>Valores de dispersão calculados através do espectro do PCM (38o9.25W);</li><li>Período de pico.</li></ul>
TPAR1_médio	<ul style="list-style-type: none"><li>Ficheiro de entrada com parâmetros integrais;</li><li>Valores de dispersão calculados através do espectro do PCM (38o9.25W);</li><li>Período médio.</li></ul>
TPAR	<ul style="list-style-type: none"><li>Ficheiro de entrada com parâmetros integrais;</li><li>Valores de dispersão calculados através do espectro do IM (38o10W);</li><li>Período de pico.</li></ul>
Espectro IM	<ul style="list-style-type: none"><li>Ficheiro de entrada em forma de espectro 2D do IM</li></ul>

Figura C.1. - Resultados obtidos (em cima) para diferentes condições de fronteira (em baixo).

#### C.2 Apresentação dos diferentes ficheiros de entrada para as diferentes aplicações no modelo SWAN.

- Cálculos em modo estacionário



## Ficheiro para o domínio exterior

```
PROJECT 'pdc' '1'  
SET 2 90 0 NAUTICAL  
MODE STATIONARY TWODIMENSIONAL  
COORDinates CART  
CGRID REG 102000 89000 0 42700 88000 85 176 CIRCLE 90 0.04 1 23  
INPGRID BOTTOM REG 101200 88300 0 87 177 500 500 EXC 0  
READINP BOTTOM 1. 'BATIMETRIA.BOT' idla=3  
$-----wave settings  
BOUND SHAPespec JONSWAP 3.3 PEAK DSPR DEGREES  
BOUN SIDE W CON 8.76 17.99 267.13 11.65  
$----- Physics  
OFF QUAD  
TRIad  
FRICTION JONSWAP 0.038  
BREAKING CONSTANT  
$-----  
NUMeric ACCUR &  
NONSTAT 15 0.1  
$----- Output  
NGRID 'outNgrid' 124000 124000 0 21000 29000 42 58  
NEStout 'outNgrid' 'outgrid.dat' OUTPUT 20010124.12 3 HR  
FRAME 'pdc' 102000 89000 0 42700 88000 85 176  
TABLE 'pdc' HEADER 'malha109.dat' XP YP HSIGN TM02 PDIR DEP RTP DSPR FSPR  
CURVE 'CN' 141650 144650  
TABLE 'CN' HEADER 'pontos.dat' XP YP HSIGN TM02 PDIR DEP RTP DSPR FSPR  
$  
TEST 0,0  
COMPUTE  
STOP
```

- Cálculos em modo não estacionário com introdução de campo de ventos

1. Forçamento na fronteira de um ficheiro com parâmetros integrais.

**Ficheiro para o domínio exterior**

```

PROJECT 'pdc' '1'
SET 2 90 0 NAUTICAL
MODE NONSTATIONARY TWODIMENSIONAL
COORDinates CART
CGRID REG 45000 25000 0 100000 190000 100 190 CIRCLE 90 0.04 1 23
INPGRID BOTTOM REG 36700 23800 0 110 193 1000 1000 EXC 0
READINP BOTTOM 1. 'BATIMETRIA.BOT' idla=3
INPGRID WIND REG -77597 -85320 59 57 5600 5600 EXC 0 &
NONSTationary 20010206.12 1 HR 20010207.12
READINP WIND 1. SERIES 'wind2.dat' idla=2
$-----wave settings
BOUND SHAPespec JONSWAP 3.3 PEAK DSPR DEGREES
BOUN SIDE W CON FILE 'TPAR2.txt' 1
$-----Physics
GEN3
QUAD
TRIad
FRICTION JONSWAP 0.038
BREAKING CONSTANT
$-----
NUMeric ACCUR &
NONSTAT 15 0.1
$-----Output
NGRID 'outNgrid' 82000 82000 0 63000 95000 63 95
NEStout 'outNgrid' 'outgrid.dat' OUTPUT 20010124.12 5 MIN
FRAME 'pdc' 45000 25000 0 100000 190000 100 190
TABLE 'pdc' HEADER 'malha38.dat' XP YP HSIGN TM02 PDIR DEP RTP DSPR
CURVE 'CN' 141650 144650
TABLE 'CN' HEADER 'pontos.dat' XP YP HSIGN TM02 PDIR DEP RTP DSPR FSPR
$
TEST 0,0
COMPUTE NONstationary 20010206.12 5 MIN 20010207.12
STOP

```

## 2. Forçamento na fronteira de um ficheiro com espectro direccional de variância.

### Ficheiro para o domínio exterior

```
PROJECT 'pdc' '1'
SET 2 90 0 NAUTICAL
MODE NONSTATIONARY TWODIMENSIONAL
COORDinates CART
CGRID REG 102000 89000 0 42700 88000 85 176 CIRCLE 90 0.04 1 23
INPGRID BOTTOM REG 101200 88300 0 87 177 500 500 EXC 0
READINP BOTTOM 1. 'BATIMETRIA.BOT' idla=3
INPGRID WIND REG -77597 -8532 0 59 57 5600 5600 EXC 0 &
NONSTAtionary 20010124.12 1 HR 20010125.14
READINP WIND 1. SERIES 'wind6.dat' idla=2
$-----wave settings
BOUN SIDE W CON FILE 'espectroPCM38.25_9.25.dat'
$----- Physics
GEN3
QUAD
TRIad
FRICTION JONSWAP 0.038
BREAKING CONSTANT
$-----
NUMeric ACCUR &
NONSTAT 15 0.1
$----- Output
NGRID 'outNgrid' 124000 124000 0 21000 29000 42 58
NEStout 'outNgrid' 'outgrid.dat' OUTPUT 20010124.12 3 HR
FRAME 'pdc' 102000 89000 0 42700 88000 85 176
TABLE 'pdc' HEADER 'malha109.dat' XP YP HSIGN TM02 PDIR DEP RTP DSPR FSPR
CURVE 'CN' 141650 144650
TABLE 'CN' HEADER 'pontos.dat' XP YP HSIGN TM02 PDIR DEP RTP DSPR FSPR
$
TEST 0,0
COMPUTE NONstationary 20010124.12 2 MIN 20010125.12
STOP
```

