

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Faculdade de Ciências do Mar e do Ambiente

**Calibração e Validação do Modelo Espectral de
Previsão da Agitação Marítima SWAN em Zonas
Costeiras**

Francisco Sansana Silva

Tese de Mestrado em Oceanografia

Setembro de 2009

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Faculdade de Ciências do Mar e do Ambiente



**Calibração e Validação do Modelo Espectral de
Previsão da Agitação Marítima SWAN em Zonas
Costeiras**

Tese de Mestrado em Oceanografia

Francisco Sansana Silva

Orientadores Científicos:

Dr. José Jacob (Univ. Algarve)

Dr. José Paulo Pinto (Univ. Lusófona/Inst. Hidrográfico)

Setembro de 2009

Resumo

A previsão das condições de agitação marítima assume, cada vez mais, um papel preponderante na evolução da economia, associada à exploração dos recursos marinhos ou costeiros. Por esta razão, torna-se estritamente necessário, compreender os fenómenos oceânicos com implicações neste campo, bem como melhorar a previsão de situações de risco ou possivelmente condicionantes para estas actividades.

Com este intuito, procedeu-se à calibração do modelo espectral de previsão da agitação marítima SWAN (Simulating WAVes Nearshore), para uma zona de transição entre águas profundas e zonas costeiras. De forma a otimizar este processo, recorreu-se à metodologia de calibração inversa, através da utilização do modelo MICUT (Model Independent Calibration and Uncertainty Analysis Toolbox), que recorre ao algoritmo de Levenberg-Marquardt, e pode ser utilizado na resolução de problemas não lineares de mínimos quadrados.

No decorrer deste processo foram analisadas as diferentes formulações existentes no modelo SWAN, utilizadas para resolver os diferentes fenómenos físicos, que descrevem a propagação da agitação no oceano. Os resultados alcançados representam uma melhoria significativa na exactidão do modelo SWAN, tendo sido obtida uma redução bastante expressiva do erro associado à previsão da altura significativa, bem como um novo conjunto de parâmetros para as diferentes formulações. No decorrer deste trabalho, é notório o recente desenvolvimento do modelo, através da introdução da formulação de Westhuysen, que descreve a geração de ondas por acção do vento e controla a dissipação de energia por rebentação parcial (*whitecapping*). Esta formulação apresenta um nível de exactidão bastante elevado, com um erro médio bastante inferior às restantes formulações, sendo esta diferença mais notória em situações em que as condições de agitação apresentem uma mistura entre vaga e ondulação, situação recorrente na costa Portuguesa.

Palavras chave: SWAN, Calibração Inversa, MICUT, Levenberg-Marquardt, Validação, Previsão da Agitação Marítima

Abstract

The forecast and assessment of the wave conditions in coastal areas is of extreme importance in our present days. With the intensification of economical activities in these regions, it is vital to ensure the safety of the economical operators and the practicability of their activities. The wave forecast and hindcast allows the evaluation of coastal engineering projects and may prevent accidents or environmental disasters.

With this in mind, this work presents a calibration of the spectral wave model SWAN (Simulating WAVes Nearshore), for an area between deep waters and coastal regions. In order to optimize this calibration process, an inverse calibration methodology has been implemented, with the MICUT model (Model Independent Calibration and Uncertainty Analysis Toolbox), which is based in the Levenberg-Marquardt algorithm, and can be used to solve non linear least squares problems. Throughout this process, the distinct formulations available in SWAN were analyzed, in order to identify the parameters that control the physical processes with a significant role in wave propagation.

The results achieved within this work, reveal a significant improvement in SWAN's accuracy, with a large reduction in the RMSE and in the Scatter Index, for the significant wave height results. A direct result of this calibration is the presentation of a new set of parameters, for the available formulations. The new developments in the model, particularly with the implementation of the Westhuysen formulation, which solves the wave growth by wind and the wave energy dissipation by white-capping, improves considerably the model performance. This formulation allows a more accurate wave forecast, essentially in situations under a combined swell-sea conditions, in which other formulations present poorer results. This improvement is particularly important for the Portuguese Coast forecast, since that this type of conditions are the most frequent wave conditions expected in this area.

Palavras chave: SWAN, Inverse Calibration, MICUT, Levenberg-Marquardt, Validation, Wave Forecast

Agradecimentos

O teu apoio inesgotável é a base do meu trabalho e o meu porto de abrigo. A ti Filipa, dedico este trabalho.

Gostaria de agradecer aos meus pais por tudo o que fizeram por mim. O vosso apoio e exemplo tiveram um papel fundamental na minha vida. Sei que sem a vossa ajuda, hoje não seria quem sou.

Simão, agora és tu. Estou com a contar contigo.

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que contribuíram directa ou indirectamente na realização deste trabalho, e pelas quais guardo uma grande estima.

Gostaria de agradecer aos meus orientadores científicos, o Dr. José Paulo Pinto e o Dr. José Jacob, pelo apoio, ajuda e aconselhamento prestado ao longo deste trabalho.

Agradeço à Dra. Sara Almeida pela ajuda preciosa na revisão deste trabalho.

Ao Instituto Hidrográfico, pelo apoio inesgotável e pela cedência das condições necessárias à realização deste trabalho.

Uma palavra de agradecimento especial à Carina, por todo o apoio que me deu ao longo da execução deste trabalho.

O pentágono, apesar de cada vez possuir os vértices mais distanciados, nunca se separa. Estarão sempre no meu coração. Obrigado amigos.

The author is especially grateful for the support provided by Dr. Brian Skahill in the MICUT implementation.

Índice

Resumo	iv
Abstract	v
Agradecimentos	vi
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
1.1 Ondas de superfície geradas pelo vento	2
1.1.1 Definições Gerais	3
1.1.2 Análise Espectral	6
1.2 Modelo Espectral SWAN	11
1.3 Metodologia de Calibração Inversa	24
1.4 Área de Estudo	29
1.5 Caracterização do Clima de Agitação Marítima	31
2 Metodologia	33
3 Resultados	40
4 Discussão	58
5 Conclusões	64
Bibliografia	66

Lista de Figuras

1.1	Parâmetros básicos para descrever uma onda de superfície.	3
1.2	Cenário A - zona de geração longe da costa, o que levará à formação de ondulação; Cenário B - zona de geração perto da costa, o que levará à formação de vaga	4
1.3	Vaga - Exemplo de uma zona de forte geração, onde é possível identificar a elevada irregularidade das ondas (Fonte: COMET)	5
1.4	Ondulação - A uniformidade e o aspecto regular do campo de agitação demonstra que as ondas foram formadas a alguma distância, sendo também possível verificar a ausência de vento no local (Fonte: COMET)	5
1.5	Ilustração exemplificativa das diferentes grelhas utilizadas no modelo SWAN (adaptado do trabalho de Marco Miani e retirado de http://www.texample.net/tikz/examples/swan-wave-model).	13
1.6	Representação de uma função objectivo num espaço bi-paramétrico. A caixa a azul representa os limites físicos dos parâmetros e a elipse a vermelho representa os valores dos parâmetros para os quais o modelo se encontra devidamente calibrado. A seta indica a evolução dos parâmetros até atingir o mínimo da função objectivo.	25
1.7	Representação do fenómeno de “ <i>hemstitching</i> ”. Adaptado de Doherty (2004).	27
1.8	Representação batimétrica da Costa Portuguesa e localização da área de estudo, assinalada pelo rectângulo a vermelho.	29

1.9	Representação batimétrica da área de estudo, assinalada através do rectângulo a vermelho. Localização das bóias utilizadas neste trabalho: Bóia PE (Puertos del Estado) e Bóia IH (Instituto Hidrográfico).	30
2.1	Gráfico da evolução da altura significativa medida nas estações ondógrafo de Cabo Silleiro e de Leixões	35
2.2	Gráfico da evolução do período de pico medido nas estações ondógrafo de Cabo Silleiro e de Leixões	36
2.3	Gráfico da evolução da direcção de incidência medido nas estações ondógrafo de Cabo Silleiro e de Leixões. Estes valores são apresentados em graus, medidos no sentido dos ponteiros do relógio a partir do Norte Geográfico.	37
3.1	Diagramas de dispersão para as diferentes configurações com a formulação de Komen. São apresentadas as equações da rectas de regressão linear obtidas para a distribuição dos pontos, passando pela origem (a preto) e a recta de melhor ajuste não passando pela origem (a vermelho).	45
3.2	Diagramas de dispersão para as diferentes configurações com a formulação de Janssen. São apresentadas as equações da rectas de regressão linear obtidas para a distribuição dos pontos, passando pela origem (a preto) e a recta de melhor ajuste não passando pela origem (a vermelho).	46
3.3	Diagramas de dispersão para as diferentes configurações com a formulação de Westhuysen . São apresentadas as equações da rectas de regressão linear obtidas para a distribuição dos pontos, passando pela origem (a preto) e a recta de melhor ajuste não passando pela origem (a vermelho).	47
3.4	Comparação das observações com os resultados da altura significativa, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Komen - Madsen.	48

3.5	Comparação das observações com os resultados da altura significativa, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Komen - Collins.	49
3.6	Comparação das observações com os resultados da altura significativa, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Komen - JONSWAP.	49
3.7	Comparação das observações com os resultados da altura significativa, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Janssen - Madsen.	50
3.8	Comparação das observações com os resultados da altura significativa, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Janssen - Collins.	50
3.9	Comparação das observações com os resultados da altura significativa, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Janssen - JONSWAP.	51
3.10	Comparação das observações com os resultados da altura significativa, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Westhuysen - Madsen.	52
3.11	Comparação das observações com os resultados da altura significativa, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Westhuysen - Collins.	52
3.12	Comparação das observações com os resultados da altura significativa, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Westhuysen - JONSWAP.	53
3.13	Variação do RMSE ao longo do processo de calibração, referente à altura significativa, para as diferentes configurações com a formulação de Komen.	54
3.14	Variação do RMSE ao longo do processo de calibração, referente à altura significativa, para as diferentes configurações com a formulação de Janssen.	55

3.15	Variação do RMSE ao longo do processo de calibração, referente à altura significativa, para as diferentes configurações com a formulação de Westhuysen.	55
3.16	Comparação das observações com os resultados do período de pico, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Komen - Madsen.	56
3.17	Comparação das observações com os resultados do período de pico, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Jansen - Madsen.	56
3.18	Comparação das observações com os resultados do período de pico, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Westhuysen - Madsen.	57
3.19	Variação do RMSE referente ao período de pico, para as diferentes configurações ao longo da calibração	57

Lista de Tabelas

2.1	Configurações utilizadas nas simulações, apresentando as diferentes formulações para a geração de ondas por acção do vento e para o atrito de fundo.	38
2.2	Valores pré-definidos (iniciais) para cada parâmetro e os seus intervalos de variação.	38
3.1	Análise estatística dos resultados para as configurações correspondentes à formulação de Komen.	42
3.2	Análise estatística dos resultados para as configurações correspondentes à formulação de Janssen.	43
3.3	Análise estatística dos resultados para as configurações correspondentes à formulação de Westhuysen.	44
4.1	Valores de pré-definidos (iniciais) para cada parâmetro e os novos parâmetros calculados após a calibração (<i>best</i>) para a formulação de Komen. Os parâmetros estão divididos por configuração, variando entre si a formulação para o atrito de fundo (Atrito).	60
4.2	Valores de pré-definidos (iniciais) para cada parâmetro e os novos parâmetros calculados após a calibração (<i>best</i>) para a formulação de Westhuysen. Os parâmetros estão divididos por configuração, variando entre si a formulação para o atrito de fundo (Atrito).	61

Capítulo 1

Introdução

No passado, a caracterização das condições de agitação baseou-se na utilização de medições realizadas por estações ondógrafo, que apenas permitiam a análise pontual do estado do mar.

Hoje em dia, o conhecimento das condições de agitação junto à costa reveste-se de extrema importância para o planeamento das actividades marítimas, quer ligadas à aproximação de navios a portos, movimentações de embarcações de pesca ou recreio, quer para as actividades económicas e de lazer que se desenvolvem no litoral. A necessidade de obter uma caracterização com uma maior cobertura geográfica e com a capacidade de prever o estado do mar nos locais de interesse, impulsionou o aperfeiçoamento dos modelos numéricos de previsão da agitação. Estes modelos, quando aliados a previsões dos campos de vento, permitem prever com algum rigor as condições de agitação para uma vasta área. De forma a obter uma maior fiabilidade dos resultados obtidos, tem sido realizado um esforço crescente, com vista ao melhoramento dos modelos numéricos de previsão da agitação marítima.

O modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore, Booij *et al.* (1999)) é um modelo espectral de 3^a. geração, que possui a capacidade de simular e descrever a propagação das ondas em águas pouco profundas. Este modelo, de aplicação prática em zonas costeiras, estuários e lagos, considera todos os processos relevantes para realizar uma adequada descrição da agitação marítima nestes locais, tais como a refacção devida à variação da profundidade e à variação das correntes, dissipação de energia por rebentação parcial, dissipação de energia por rebentação induzida pelo fundo e interacções não lineares entre ondas.

Apesar da ampla aplicação do SWAN a diferentes cenários de modelação, continua a existir uma fonte de erro associada às configurações próprias do modelo para determinadas escalas espaciais de aplicação. De forma a minimizar estes erros, que atingem valores significativos em áreas costeiras, pretende-se com este trabalho calibrar o modelo SWAN para as condições de agitação em zonas costeiras. Numa primeira fase serão realizados testes de calibração do modelo, ajustando os diferentes parâmetros físicos do modelo, de forma a minimizar estes erros. Numa fase posterior será validado o modelo, através da comparação entre os dados obtidos pelo modelo e os dados obtidos por medições *in situ*.

Este trabalho tem como objectivos calibrar o modelo espectral SWAN através da metodologia de calibração inversa, para as formulações que descrevem os processos de propagação da agitação marítima, de águas profundas para zonas costeiras. Pretende-se comprovar que esta metodologia, já aplicada a outro tipo de modelos, é passível de ser executada com o modelo SWAN, estando previsto a sua aplicação posterior a outro tipo de formulações e parametrizações. Pretende-se também com este trabalho, validar o modelo SWAN para a Costa Oeste da Península Ibérica e analisar as suas principais fontes de erro.

1.1 Ondas de superfície geradas pelo vento

Quando observamos o oceano, é bastante raro não ser possível identificar ondas na sua superfície. A maioria das ondas observadas no oceano são geradas pela interacção entre o vento e a superfície do mar. Esta acção impulsiona a geração das ondas, que por vezes se deslocam por grandes distâncias, terminando normalmente por rebentar numa praia, tendo-se tornado esta a sua imagem de marca. Devido ao impacto visual que causam ao rebentar na praia e também pelas dificuldades que apresentam aos marinheiros em oceano aberto, as ondas sempre criaram um fascínio especial no Homem. Desde cedo começaram a ser analisadas em maior detalhe e no início do século XIX surgiam as primeiras formulações teóricas, descrevendo a base física deste fenómeno (Thurman e Trujillo, 1999).

1.1.1 Definições Gerais

No Oceano, podemos encontrar ondas de diferentes tamanhos e com diferentes direções, formando um padrão bastante complexo e em constante alteração. De forma a simplificar uma primeira análise, podemos antes considerar uma única onda sinusoidal, identificando as suas características mais simples, tal como é apresentado na Figura 1.1.

- O comprimento de onda, $\lambda(m)$, é a distância horizontal entre duas cristas sucessivas ou duas cavas sucessivas
- O período de uma onda, $T(s)$, é o intervalo de tempo entre a passagem de duas cristas sucessivas por um determinado ponto
- A amplitude de uma onda, $a(m)$, é o valor máximo de deslocamento vertical, em relação ao nível médio do mar
- A altura de uma onda, $H(m)$, é a diferença do deslocamento vertical, entre uma crista e uma cava adjacentes

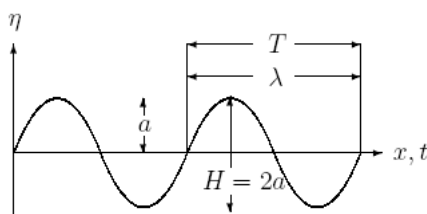


Figura 1.1: Parâmetros básicos para descrever uma onda de superfície.

Este tipo de características permite-nos caracterizar com alguma facilidade este tipo de onda uniforme. No entanto não são utilizadas de forma frequente para caracterizar um campo de agitação, simplesmente porque a complexidade da agitação na natureza necessita de outro tipo de análise, de maior complexidade e vocacionada para a observação do campo de agitação de uma forma mais ampla. Analisando o "ciclo de vida" de uma onda, podemos verificar que esta acaba por sofrer bastantes modificações ao longo do tempo, por transferência de energia com outras ondas, interações com o fundo ou através da acção do vento. Este ciclo inicia-se quando o vento interage com a superfície do oceano. Desta interacção surge uma onda, que se começa a desenvolver e a aumentar de tamanho, à medida que o vento transfere

energia para a superfície do oceano. Eventualmente, esta onda acabará por sair da área onde ocorreu o forçamento inicial e propagar-se-à pela superfície do oceano até rebentar numa praia distante do local onde foi gerada. Tendo em conta a sua forma de geração podemos dividir estas ondas em dois grandes grupos, a vaga (*sea*) e a ondulação (*swell*) (Figura 1.2).

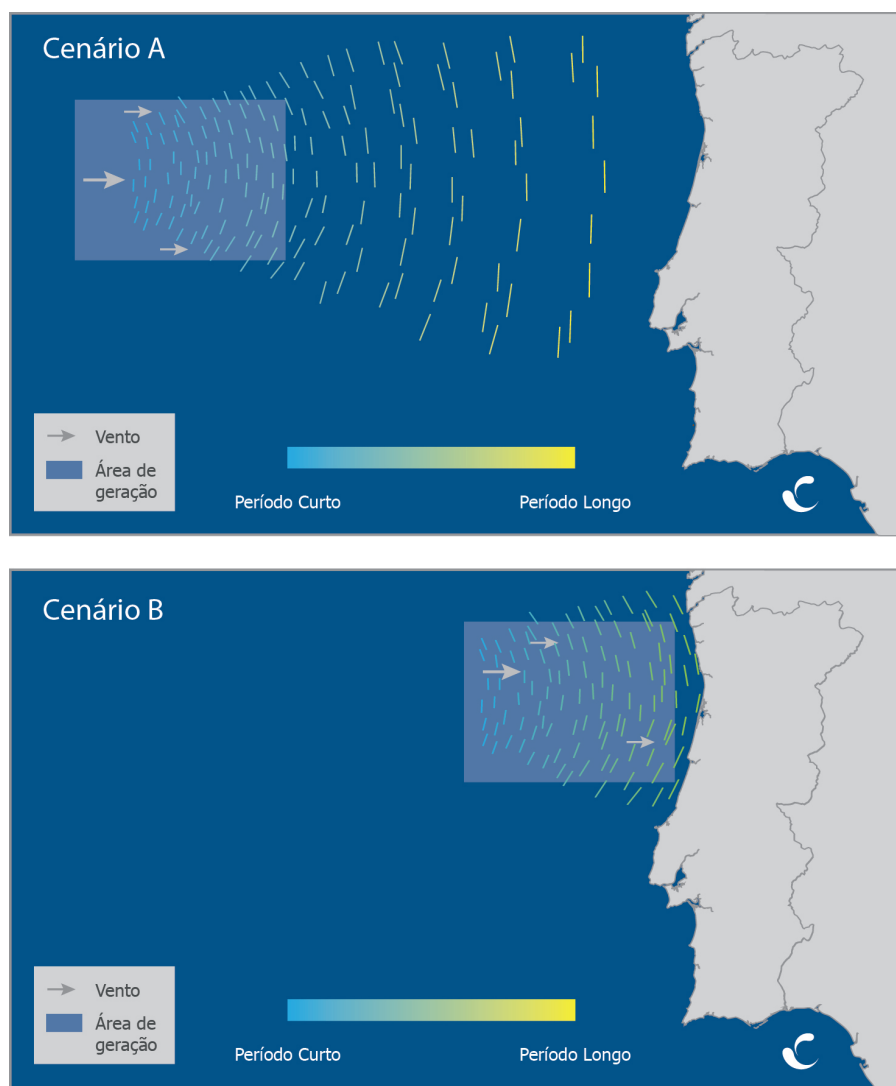


Figura 1.2: Cenário A - zona de geração longe da costa, o que levará à formação de ondulação; Cenário B - zona de geração perto da costa, o que levará à formação de vaga

A vaga representa as ondas de curto período, que se encontram na área em que foram geradas ou perto do seu local de geração e de aspecto altamente irregular (Figura 1.3). Possuem um declive bastante elevado, aparentando não existir uma direcção comum a todas as ondas, mas cuja resultante será aproximadamente a direcção do vento.



Figura 1.3: Vaga - Exemplo de uma zona de forte geração, onde é possível identificar a elevada irregularidade das ondas (Fonte: COMET)

Pelo contrário a ondulação, que é caracterizada por um período mais elevado (normalmente superior a 10 segundos), apresenta um aspecto mais regular, de cristas de baixo declive e com uma direcção bem definida (Figura 1.4). Este tipo de ondas encontra-se fora da área de geração e longe da influência dos ventos que as geraram.



Figura 1.4: Ondulação - A uniformidade e o aspecto regular do campo de agitação demonstra que as ondas foram formadas a alguma distância, sendo também possível verificar a ausência de vento no local (Fonte: COMET)

1.1.2 Análise Espectral

As ondas geradas pelo vento possuem alturas e períodos irregulares, devido à própria natureza irregular do campo de ventos, impossibilitando uma abordagem determinística para descrever o campo de agitação. Desta forma, torna-se necessário descrever a superfície do mar como um processo estocástico, caracterizando todas as possíveis observações num registo temporal. No entanto, as propriedades estatísticas da sua superfície, tais como a altura significativa, períodos e direcções, variam muito lentamente no tempo e no espaço, quando comparados com os respectivos períodos e comprimentos de onda. A elevação da superfície do oceano, devida à acção das ondas gravíticas, pode ser vista como o somatório de uma conjunto de ondas harmónicas, geradas por diferentes campos de vento, em diferentes locais e tempos, sendo por isso estatisticamente independentes quanto à origem. De acordo com a teoria de onda linear, estas ondas permanecem independentes umas das outras, no decorrer da sua progressão no oceano, sendo por isso possível descrevê-las como um processo estacionário, tendo como escala temporal uma centena de períodos de onda característicos. Desta forma poderemos descrever a elevação da superfície do oceano, num determinado ponto, em função do tempo como:

$$\eta(t) = \sum_{j=1}^N a_j \cos(2\pi f_j t + \alpha_j) \quad (1.1)$$

sendo $\eta(t)$ a elevação da superfície do oceano, a_i a amplitude de uma componente de onda, f_i a frequência da mesma componente, t o tempo e α_i a fase aleatória inicial da componente de onda. Este tipo de modelos é normalmente apelidado de modelos de fase aleatória.

Para um determinado espectro de amplitudes é então possível obter a elevação da superfície, através da fase e amplitude de cada valor amostrado, resolvendo cada frequência de forma independente. No entanto este tipo de modelos continua a possuir muitas limitações à sua aplicação no Oceano, uma vez que se baseia na descrição de um processo estacionário, o que muito dificilmente acontecerá na Natureza. Além disso assume que as ondas são independentes, o que não acontece na realidade, uma vez que é frequente ocorrer interacções entre ondas (Komen *et al.*, 1994).

Por outro lado, o modelo de fase aleatória representa um somatório de componentes de onda distintas, discretizadas em intervalos de frequência definidos *à priori*,

sendo que, no oceano, as ondas representam um espectro contínuo de frequências. De forma a conseguir obter um espectro contínuo em frequência, será necessário realizar algumas transformações à elevação da superfície do oceano, a fim de obtermos o espectro de variância de densidade. Para tal, será necessário aplicar uma transformada de Fourier à função de auto-covariância da elevação da superfície do mar:

$$E'(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(\tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (1.2)$$

sendo

$$C(\tau) = \langle \eta(t)\eta(t + \tau) \rangle \quad (1.3)$$

onde $C(\tau)$ representa a função de auto-covariância, $\eta(t)$ e $\eta(t + \tau)$ representam dois processos aleatórios de elevação da superfície e τ representa o distanciamento temporal entre estes processos.

Holthuijsen (2007) demonstra que na realidade o espectro utilizado normalmente, difere um pouco do apresentado, uma vez que se convencionou que:

$$E(f) = 2E'(f) \quad \text{para } f \geq 0 \quad \text{e } E(f) = 0 \quad \text{para } f < 0 \quad (1.4)$$

sabendo que a variância da elevação da superfície do oceano pode ser obtida através de:

$$\langle \eta^2 \rangle = C(0) = \int_0^{+\infty} E(f) df \quad (1.5)$$

sendo $E(f)$ interpretado como a variância de densidade, que se encontra distribuída ao longo da totalidade do espectro de frequências. Na condição da elevação da superfície ser dada em metros e a frequência em Hz , as unidades de $E(f)$ serão m^2/Hz . Multiplicando este valor pela densidade da água do mar (ρ_w) e pela força gravítica (g), é nos possível obter a energia das ondas (E_{tot}) por unidade de área de superfície, obtendo assim o espectro de densidade de energia:

$$E_{tot} = \frac{1}{2} \rho_w g \langle \eta^2 \rangle \quad (1.6)$$

De uma forma geral, é possível através da análise do espectro, obter o aspecto geral

das ondas que estão na sua origem. Se estivermos perante um espectro bastante estreito, sendo no limite composto por apenas uma frequência, o campo de agitação será regular, uma vez que apenas está representada uma harmónica. No entanto se o espectro possuir um domínio de frequências mais abrangente, veremos que já existe um distanciamento em fase das diferentes ondas, o que gerará um campo de agitação bastante caótico e desordenado (Holthuijsen, 2007).

Até este momento estivemos apenas a analisar um espectro uni-dimensional, que apenas nos permite caracterizar a elevação da superfície do oceano, resultante de um processo estacionário, em função do tempo e apenas numa localização geográfica fixa.

No oceano, um campo de agitação real é bastante mais complexo, uma vez que depende da dimensão horizontal, sendo por isso necessário transformarmos o nosso espectro num espectro tri-dimensional. Assim sendo, podemos expandir o nosso modelo anterior, considerando uma onda que se propaga no espaço $x - y$, com a direcção θ relativa ao eixo do x . Poderemos então definir o espectro de densidade de energia em função da frequência e direcção, passando a ser representado por:

$$E(f) = \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta \quad (1.7)$$

Este tipo de espectro permite-nos uma análise de diferentes sistemas de agitação presentes num determinado local. Tomemos por exemplo o caso da Costa Ocidental Portuguesa. É frequente encontrarmos campos de agitação dominados por um sistema de baixa frequência gerado na região do Atlântico central, observando no mesmo espectro a presença de um sistema de alta frequência, normalmente de direcção distinta, que será gerado pela acção do vento local. Desta forma torna-se bastante simples definir o tipo de agitação de incidente, analisando separadamente os diferentes sistemas de ondas, distinguindo com bastante facilidade se estamos sobre a influência de vaga ou de ondulação (Tucker, 1991) e as respectivas direcções de incidência.

O valor da altura de onda pode ser facilmente retirado de um registo de elevações num determinado ponto ao longo do tempo. Partindo deste registo podemos facilmente encontrar o valor de altura média para o registo. Na realidade, a agitação é normalmente caracterizada através da sua altura significativa (H_s) e não através da altura média. Esta altura significativa representa a média das alturas do terço

superior do registo de alturas :

$$H_s = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} H_j \quad (1.8)$$

sendo N o número de ondas registadas e sendo j , não a posição no registo (da sequência temporal) mas sim a posição da onda, baseada numa organização decrescente de alturas ($j=1$ a onda de maior altura, $j=2$ a segunda onda de maior altura, etc.). Esta forma de organização poderá parecer um pouco desajustada, no entanto, a altura significativa ajusta-se com grande rigor à observação visual da agitação. Se fizermos uma análise visual da altura das ondas durante um determinado período, iremos observar que, de grosso modo, o nosso valor final será bastante mais próximo da altura significativa do que da altura média (Holthuijsen, 2007).

De forma análoga, poderemos realizar a mesma estimativa para o período, utilizando também o terço das ondas superiores e organizando o registo por ordem decrescente de alturas, correspondendo j à mesma sequência utilizada na equação (1.8), e não à sequência temporal:

$$T_s = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} T_j \quad (1.9)$$

Da mesma forma que se obtém o período de uma onda, também é possível obter a sua frequência (f), que neste caso será o inverso do período, ou seja, tendo um ponto fixo no espaço, será o número de cristas ou cavas que passam neste ponto, por unidade de tempo.

No entanto também é possível obter este tipo de parâmetros estatísticos de caracterização da agitação directamente do espectro, assumindo que a elevação da superfície do Oceano representa uma distribuição Gaussiana. Os parâmetros estatísticos podem ser obtidos através dos diversos momentos de ordem n , a partir do espectro de densidade de energia:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n E(f) df \quad (1.10)$$

na qual a variância da elevação da superfície do mar é dada pelo momento de ordem

zero deste espectro ($m_0 = \langle \eta^2 \rangle$). Existem vários parâmetros estatísticos que podemos obter através deste espectro, no entanto o mais usual será a altura significativa, que pode ser dada por:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \tag{1.11}$$

1.2 Modelo Espectral SWAN

A previsão das condições de agitação é uma temática em constante actualização e desenvolvimento. As diferentes abordagens, destinadas à resolução de diferentes problemas, possuem à partida limitações específicas a cada aplicação, não existindo ainda uma solução global e inequívoca (The WISE Group, 2007). De uma forma geral, a aplicação de modelos de agitação espectrais de terceira geração reúne o consenso da comunidade e tem sido amplamente utilizada (Booij *et al.* (1999), Dykes *et al.* (2009), Garcia *et al.* (2005), Holthuijsen (2007), Pires-Silva *et al.* (2002), Ris *et al.* (1999), Rogers (2005), Rogers *et al.* (2007), Rusu *et al.* (2008a), Rusu *et al.* (2008b), Tolman (2002b)).

O modelo espectral SWAN (Simulating WAVes Nearshore, Booij *et al.* (1999)) é um modelo espectral de previsão da agitação desenvolvido pela Delft University of Technology. Este modelo, destinado a aplicações em zonas costeiras e em lagos, engloba a grande maioria dos processos físicos que alteram o campo de agitação nas zonas costeiras. Este modelo utiliza um esquema Euleriano para a discretização temporal e assume que as propriedades das ondas variam muito pouco ao longo de um comprimento de onda. Ao contrário dos modelos que resolvem as características da própria onda (*phase resolving*), este modelo resolve a variação do espectro da agitação (*phase average*), em zonas de batimetria complexa, mantendo uma eficiência computacional que permite a sua utilização de forma operacional (Dykes *et al.* (2002), Dykes *et al.* (2009), Rusu *et al.* (2008b), Rogers *et al.* (2007), Sansana Silva *et al.* (2009)).

Um dos factores mais importantes atingidos com o SWAN é a possibilidade de descrever o espectro de agitação como o somatório de um número de ondas, com diferentes frequências, numa determinada área. Este tipo de modelos, são vulgarmente designados por modelos de terceira geração, tendo como base as formulações do modelo WAM (Komen *et al.*, 1994), com algumas adaptações que lhe permitem resolver os processos costeiros (Booij *et al.*, 1999). É bastante vantajoso resolver cada frequência de forma independente, uma vez que a evolução de uma única onda, logo com uma única frequência, está bem definida e documentada através da teoria de onda linear, em oposição à evolução da totalidade do espectro. Além disso, o espectro de agitação, que descreve a energia das ondas em função da sua frequência, poderá assumir formas bastante distintas, sofrendo alterações consideráveis ao longo do tempo e do espaço. Os modelos de segunda geração, ao contrário das novas for-

mulações, não nos permitem descrever estas alterações na forma do espectro, uma vez que os seus poucos parâmetros de calibração, não nos permitem reproduzir estas alterações de forma rigorosa, além de possuírem *à priori* limitações na forma do espectro.

O modelo SWAN, no processo de simulação da agitação, necessita de vários tipos de dados de entrada, para conseguir resolver a evolução da agitação ao longo do tempo e do espaço de forma equilibrada. Para realizar este processo será sempre necessário fornecer ao modelo uma grelha computacional, uma grelha batimétrica e um forçamento inicial, ou condições de fronteira iniciais. No entanto existem outros tipos de dados que poderão melhorar os resultados do modelo, tais como um campo de forçamento atmosférico, um campo de correntes e um campo variável de coeficientes de atrito de fundo. De forma a melhorar os resultados do modelo, é também possível utilizar um sistema de grelhas encaixadas (metodologia de *nesting*), em que se evolui no sentido da menor resolução para uma resolução mais elevada, melhorando assim a exactidão do modelo ao longo da evolução da resolução espacial. Este modelo também já permite o processamento em paralelo e a utilização de grelhas não estruturadas triangulares, o que permite um aumento de resolução com a diminuição da profundidade, resolvendo de forma mais realista as zonas costeiras. Na Figura 1.5 ¹ estão ilustradas as diferentes grelhas utilizadas no SWAN.

Como já foi referido anteriormente, é possível obter uma descrição estatística do campo de agitação através do espectro de variância de densidade ou pela variância da energia $E(\sigma, \theta)$ distribuindo a energia das ondas por frequências (neste caso frequências angulares em radianos - σ) e direcções de propagação (θ). De uma forma geral, os modelos de agitação determinam a evolução da densidade do movimento $N(\vec{x}, t; \sigma, \theta)$ no espaço (\vec{x}) e no tempo (t). A utilização da densidade de movimento ($N = E/\sigma$), em detrimento da densidade de energia E , prende-se com o facto deste se conservar durante a propagação na presença de correntes, contrariamente ao que acontece com a densidade de energia (Komen *et al.*, 1994).

A evolução da densidade de movimento N é definida pela equação de conservação do movimento:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{c}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{\text{tot}}}{\sigma} \quad (1.12)$$

¹ Adaptado do trabalho de Marco Miani, retirado de <http://www.texample.net/tikz/examples/swan-wave-model>

A parte esquerda desta equação corresponde à parte cinemática, enquanto que a parte direita define os termos fonte e sumidouro (S_{tot}). O segundo termo desta equação define a propagação da energia das ondas através do espaço, no plano $x - y$ (uma vez que se considera que a corrente é uniforme na sua componente vertical (Komen *et al.*, 1994)), sendo a velocidade de grupo ($\vec{c}_g = \partial\sigma/\partial\vec{k}$) definida através da relação de dispersão ($\sigma^2 = g|\vec{k}| \tanh(|\vec{k}|d)$), correspondendo \vec{k} ao número de onda e d à profundidade. O terceiro termo representa a variação da frequência angular, devido a alterações na profundidade e interações com as correntes. O quarto termo representa as refrações provocadas pelo fundo e pelas correntes.

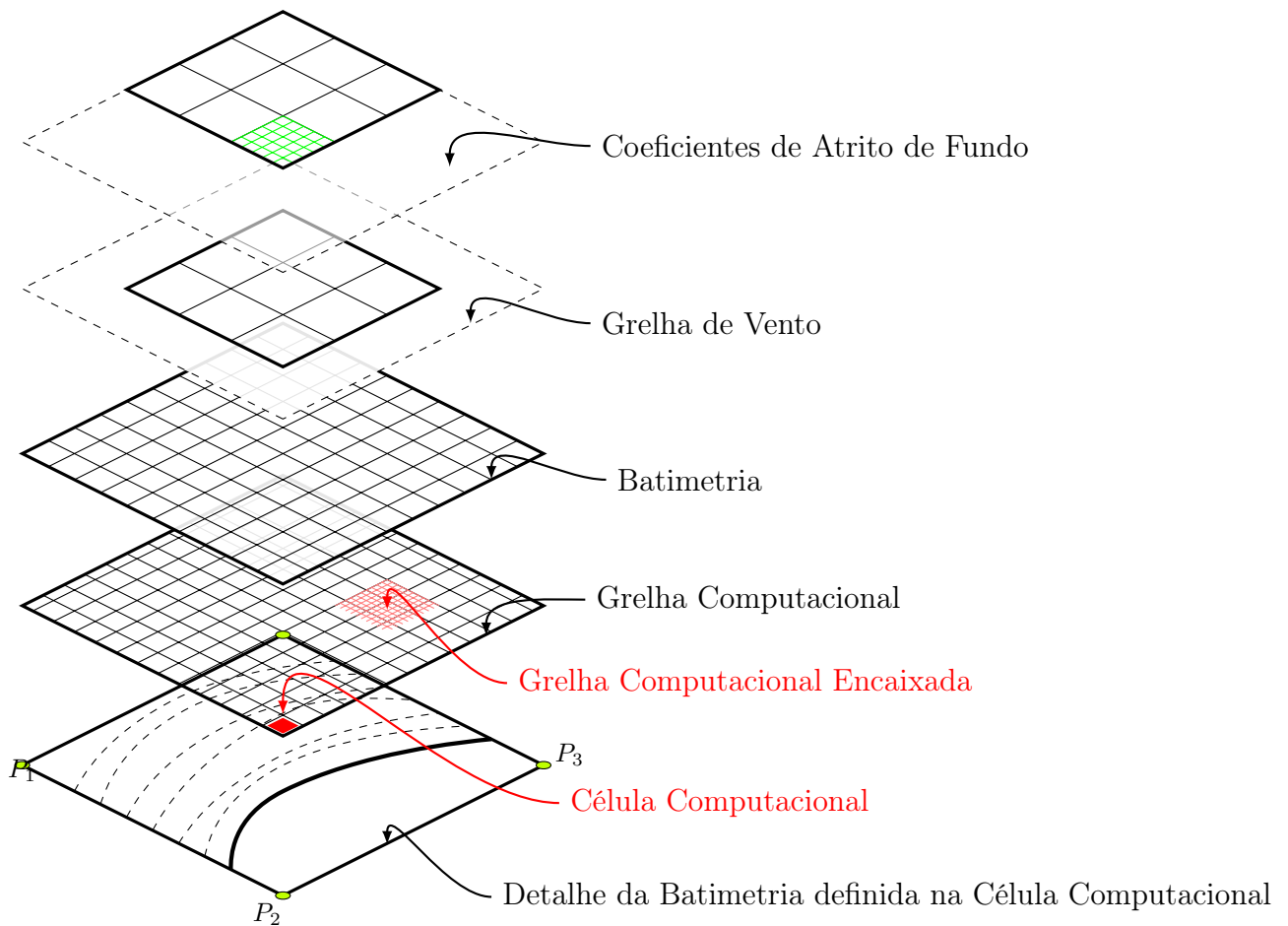


Figura 1.5: Ilustração exemplificativa das diferentes grelhas utilizadas no modelo SWAN (adaptado do trabalho de Marco Miani e retirado de <http://www.texample.net/tikz/examples/swan-wave-model>).

Esta equação pode ser reformulada, de forma a poder ser aplicada utilizando coordenadas cartesianas, normalmente para domínios de aplicação pequenos:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{\text{tot}}}{\sigma} \quad (1.13)$$

Para aplicações de escala superior, a equação (1.12) pode ser também aplicada em coordenadas esféricas:

$$\frac{\partial \tilde{N}}{\partial t} + \frac{\partial c_\lambda \tilde{N}}{\partial \lambda} + \frac{\partial c_\varphi \tilde{N}}{\partial \varphi} + \frac{\partial c_\sigma \tilde{N}}{\partial \sigma} + \frac{\partial \tilde{c}_\theta \tilde{N}}{\partial \theta} = \frac{S_{\text{tot}}}{\sigma} \quad (1.14)$$

sendo a densidade de movimento \tilde{N} definida em termos de longitude λ e latitude φ .

Em zonas costeiras existem seis processos que vão contribuir para os termos fonte e sumidouro da equação (S_{tot}):

$$S_{\text{tot}} = S_{\text{in}} + S_{\text{nl3}} + S_{\text{nl4}} + S_{\text{ds,w}} + S_{\text{ds,b}} + S_{\text{ds,br}}. \quad (1.15)$$

Os três primeiros termos desta equação correspondem respectivamente ao crescimento das ondas provocado pelo vento, à transferência de energia devido a interacções entre grupos de três ondas (*triads*) e quatro ondas (*quadruplets*). Os últimos três termos correspondem à dissipação de energia por rebentação parcial (*whitecapping*), atrito de fundo e rebentação induzida pelo fundo (Holthuijsen, 2007). No decorrer deste trabalho vai ser dado um ênfase especial à descrição dos processos que assumem um papel mais relevante na área de estudo. Assim sendo serão analisados mais aprofundadamente os processos de geração de ondas por acção do vento, dissipação de energia por rebentação parcial (*whitecapping*), atrito de fundo, e as interacções entre grupos de quatro ondas (*quadruplets*).

A transferência de energia do vento para a superfície do oceano, e conseqüente crescimento das ondas de superfície, pode ser descrita através da conjugação de um mecanismo de ressonância e de um mecanismo de resposta.

A distribuição da pressão induzida pelo vento sobre a superfície do oceano é aleatória. Esta distribuição, pode ser transformada numa onda de pressão harmónica, que se propaga seguindo a distribuição da intensidade do vento. Caso esta harmónica se encontre em fase com uma onda harmónica livre de superfície, a energia do vento será directamente transferida da onda de pressão para a onda de superfície. Esta transferência de energia, que contribui para os estados iniciais do crescimento das ondas de superfície, varia de forma linear com o tempo (Holthuijsen, 2007).

Após a geração de uma onda através do mecanismo de ressonância acima descrito, esta irá provocar uma perturbação no campo de pressão inicial, uma vez que gerará uma zona de alta pressão a barlavento da crista da onda e uma zona de baixa pressão a sotavento da crista da onda. Este movimento vertical da onda é acompanhado por uma variação do campo de pressão, transferindo assim energia para a onda. Esta transferência é proporcional à energia da própria onda, sendo por isso este crescimento exponencial no tempo, uma vez que o crescimento da onda é amplificado com o seu próprio crescimento (The SWAN Team, 2008a).

Desta forma, o crescimento das ondas de superfície por acção do vento é normalmente apresentado como a soma do crescimento linear e do crescimento exponencial:

$$S_{\text{in}}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (1.16)$$

na qual A e B dependem da direcção e frequência da onda e da direcção e intensidade do vento.

A expressão que descreve o termo A foi apresentada por Cavaleri e Malanotte-Rizzoli (1981), tendo sido posteriormente alterada por Tolman (1992), que limitou o campo de frequências calculado, eliminando as frequências abaixo da frequência de Pierson Moskowitz:

$$A = \frac{a_{cm}}{2\pi g^2} (U_* \max[0, \cos(\theta - \theta_w)])^4 H \quad (1.17)$$

$$H = \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\text{PM}}^*} \right)^{-4} \right\} \quad (1.18)$$

$$\sigma_{\text{PM}}^* = \frac{0.13g}{28U_*} 2\pi \quad (1.19)$$

na qual θ_w representa a direcção do vento, σ_{PM}^* a frequência de pico de um estado de mar completamente desenvolvido (Pierson e Moskowitz, 1964) e a_{cm} o parâmetro ajustável de Cavaleri e Malanotte-Rizzoli, que no modelo SWAN, possui por defeito o valor de 1.5×10^{-3} . U_* representa a velocidade de atrito e pode ser obtida através da formulação apresentada por Komen *et al.* (1994):

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (1.20)$$

na qual U representa a velocidade do vento a 10 metros e o coeficiente de atrito C_D é definido por Wu (1982):

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3}, & \text{para } U_{10} < 7.5 \text{ m/s} \\ (0.8 + 0.065 \text{ s/m} \times U_{10}) \times 10^{-3}, & \text{para } U_{10} \geq 7.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (1.21)$$

Para o termo exponencial (B) estão disponíveis duas formulações no SWAN. A primeira expressão foi apresentada por Komen *et al.* (1984), sendo baseada na função U_*/c_{ph} :

$$B = \max[0, 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} (28 \frac{U_*}{c_{\text{ph}}} \cos(\theta - \theta_w) - 1)] \sigma \quad (1.22)$$

sendo c_{ph} a velocidade de fase e ρ_a and ρ_w a densidade do ar e da água. Uma segunda expressão para a componente exponencial foi apresentada por Janssen (1989,1991a), sendo baseada na teoria linear de interacção onda-vento:

$$B = \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{U_*}{c_{\text{ph}}} \right)^2 \max[0, \cos(\theta - \theta_w)]^2 \sigma \quad (1.23)$$

sendo β a constante de Miles.

Esta constante pode ser obtida através da altura crítica λ :

$$\begin{cases} \beta = \frac{1.2}{\kappa^2} \lambda \ln^4 \lambda, & \lambda \leq 1 \\ \lambda = \frac{g z_e}{c_{\text{ph}}^2} e^r, & r = \kappa c / |U_* \cos(\theta - \theta_w)| \end{cases} \quad (1.24)$$

sendo $\kappa = 0.41$ a constante de Von Karman e z_e a rugosidade da superfície do oceano. Se a altura crítica for superior a 1 ($\lambda > 1$), a constante de Miles β terá o valor de zero (Janssen, 1991).

As interacções não-lineares entre grupos de ondas poderá ter, em algumas situações, grande importância, uma vez que estas interacções entre grupos de componentes das ondas em ressonância, transferem energia entre si, distribuindo esta energia ao longo do espectro. Em águas pouco profundas, as interacções entre grupos de três ondas (*triads*) dominam estes processos, das quais resulta uma transferência de energia

para frequências mais elevadas. Esta transferência de energia pode ocorrer muito rapidamente e num curto espaço, tendo por isso uma importância superior, uma vez que podem reformular completamente o aspecto do espectro, transformando um espectro de um único pico, num espectro com múltiplas frequências de pico (Holthuijsen, 2007). As interacções não-lineares entre grupos de três ondas (*triads*) são descritas pelo modelo SWAN através da aproximação de Lumped Triad (Eldeberky, 1996):

$$S_{nl3}(\sigma, \theta) = S_{nl3}^-(\sigma, \theta) + S_{nl3}^+(\sigma, \theta) \quad (1.25)$$

sendo

$$S_{nl3}^+(\sigma, \theta) = \max[0, \alpha_{EB} 2\pi c c_g J^2 |\sin \beta| \{E^2(\sigma/2, \theta) - 2E(\sigma/2, \theta)E(\sigma, \theta)\}] \quad (1.26)$$

e correspondendo S_{nl3}^- a:

$$S_{nl3}^-(\sigma, \theta) = -2S_{nl3}^+(2\sigma, \theta) \quad (1.27)$$

na qual α_{EB} é um parâmetro ajustável e β é obtido através de:

$$\beta = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh\left(\frac{0.2}{Ur}\right) \quad (1.28)$$

sendo Ur o número de Ursell:

$$Ur = \frac{g}{8\sqrt{2}\pi^2} \frac{H_s T_{m01}^2}{d^2} \quad (1.29)$$

Estas interacções são apenas calculadas para valores do número de Ursell entre $0 \leq Ur \leq 1$.

Em zonas de profundidades mais elevadas, a evolução espectral é dominada pelas interacções entre grupos de quatro ondas (*quadruplets*). Estas interacções transferem energia do pico do espectro, alterando assim a frequência de pico para valores mais baixos, e para zonas de frequência mais elevada, onde posteriormente esta energia será dissipada por *whitecapping* (Holthuijsen, 2007). No modelo SWAN existem duas formulações distintas para descrever os *quadruplets*, a formulação DIA, proposta por Hasselmann *et al.* (1985) e a formulação WRT (van Vledder, 2006). A

formulação DIA (Discrete Interaction Approximation), analisa dois grupos de quatro ondas (que apresentam uma relação de simetria para as suas direcções de incidência), sendo que estes dois grupos precisam de satisfazer as condições de ressonância, sendo por isso necessário que as componentes possuam direcções enquadradas dentro de um limite restrito. Caso existam as condições de ressonância, podemos definir esta aproximação do termo fonte como:

$$S_{\text{nl4}}(\sigma, \theta) = S_{\text{nl4}}^*(\sigma, \theta) + S_{\text{nl4}}^{**}(\sigma, \theta) \quad (1.30)$$

sendo que S_{nl4}^* corresponde ao primeiro grupo de ondas e S_{nl4}^{**} corresponde ao segundo grupo. Podemos então descrever S_{nl4}^* como:

$$S_{\text{nl4}}^* = 2\delta S_{\text{nl4}}(\alpha_1\sigma, \theta) - \delta S_{\text{nl4}}(\alpha_2\sigma, \theta) - \delta S_{\text{nl4}}(\alpha_3\sigma, \theta) \quad (1.31)$$

sendo que para obter S_{nl4}^{**} bastará aplicar uma direcção simétrica. Será necessário então analisar cada um dos componentes do grupo de forma individualizada ($i = 1, 2, \dots$):

$$\begin{aligned} \delta S_{\text{nl4}}(\alpha_i\sigma, \theta) = & C_{\text{nl4}}(2\pi)^2 g^{-4} \left(\frac{\sigma}{2\pi}\right)^{11} \left[E^2(\alpha_i\sigma, \theta) \left\{ \frac{E(\alpha_i\sigma^+, \theta)}{(1+\lambda)^4} + \frac{E(\alpha_i\sigma^-, \theta)}{(1-\lambda)^4} \right\} \right. \\ & \left. - 2 \frac{E(\alpha_i\sigma, \theta)E(\alpha_i\sigma^+, \theta)E(\alpha_i\sigma^-, \theta)}{(1-\lambda^2)^4} \right] \end{aligned} \quad (1.32)$$

tomando C_{nl4} como uma constante, com o valor de 3×10^7 .

Uma outra alternativa para resolver as interacções entre grupos de quatro ondas é a metodologia de WRT (Webb-Resio-Tracy). A aplicação desta formulação, apresentada por van Vledder (2006), resolve de forma mais exacta este tipo de fenómenos, uma vez que calcula através do integral de Boltzmann, a variação da densidade de movimento, devida às interacções entre dois grupos de quatro ondas, que partilham uma condição de ressonância. Esta condição é descrita através de:

$$\left. \begin{aligned} \vec{k}_1 + \vec{k}_2 &= \vec{k}_3 + \vec{k}_4 \\ \sigma_1 + \sigma_2 &= \sigma_3 + \sigma_4 \end{aligned} \right\} . \quad (1.33)$$

sendo esta variação de densidade de movimento, descrita para cada uma das componentes (neste caso para a primeira componente) através da seguinte equação:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial t} = & \iiint G(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3, \vec{k}_4) \delta(\vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_3 - \vec{k}_4) \delta(\sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_4) \\ & \times [N_1 N_3 (N_4 - N_2) + N_2 N_4 (N_3 - N_1)] d\vec{k}_2 d\vec{k}_3 d\vec{k}_4, \end{aligned} \quad (1.34)$$

onde a densidade de movimento N é definida através do vector do número de onda \vec{k} , $N = N(\vec{k})$ e G representando um coeficiente de ressonância. Esta metodologia apresenta melhorias significativas em relação à formulação DIA, sendo no entanto computacionalmente pouco eficiente. Este facto levanta sérios problemas na sua utilização, não sendo por isso utilizada neste trabalho (Holthuijsen (2007), Westhuysen *et al.* (2007)).

A dissipação de energia das ondas é representada através do somatório de três processos principais: rebentação parcial (*whitecapping* - $S_{ds,w}$), atrito de fundo ($S_{ds,b}$) e rebentação induzida pela profundidade ($S_{ds,br}$).

O *whitecapping* é essencialmente controlado pela declividade da onda. Nos modelos de terceira geração, a formulação base do *whitecapping* é baseada no modelo de Hasselmann (1974), tendo sido primariamente introduzido no modelo WAM (WAMDI group, 1988):

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{\tilde{k}} E(\sigma, \theta) \quad (1.35)$$

sendo Γ o coeficiente de declividade, k o número de onda e $\tilde{\sigma}$ e \tilde{k} a frequência média e o número de onda médio. Komen *et al.* (1984) estimou o valor de Γ , obtendo o balanço de energia de um estado de mar completamente desenvolvido. Este facto implica uma dependência directa da formulação utilizada na geração das ondas por influência do vento. O valor do coeficiente de declividade da onda, pode ser obtido através da formulação apresentada por Janssen (1991):

$$\Gamma = \Gamma_{KJ} = C_{ds} \left((1 - \delta) + \delta \frac{k}{\tilde{k}} \right) \left(\frac{\tilde{\sigma}}{\tilde{\sigma}_{PM}} \right)^p \quad (1.36)$$

Os coeficiente C_{ds} , δ e p representam parâmetros ajustáveis, sendo $\tilde{\sigma}$ o valor médio

da declividade da onda e \tilde{s}_{PM} é o valor de \tilde{s} para o espectro de Pierson-Moskowitz ($\tilde{s}_{PM} = \sqrt{3.02 \times 10^{-3}}$). A frequência média ($\tilde{\sigma}$), o número de onda média (\tilde{k}) e a energia total (E_{tot}) são definidos por:

$$\tilde{\sigma} = \left(E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sigma} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right)^{-1} \quad (1.37)$$

$$\tilde{k} = \left(E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{k}} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right)^{-2} \quad (1.38)$$

$$E_{tot} = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (1.39)$$

Os valores dos coeficientes ajustáveis no SWAN, C_{ds} , δ e p , foram obtidos por Komen *et al.* (1984) e Janssen (1991) uma vez que foram definidas duas formulações de crescimento distintas. Komen *et al.* (1984), propuseram (seguindo os valores do modelo WAM) como parâmetros base : $C_{ds} = 2.36 \times 10^{-5}$, $\delta = 0$ e $p = 4$. Janssen (1991) por seu lado propôs (assumindo $p = 4$) $C_{ds} = 4.10 \times 10^{-5}$ e $\delta = 0.5$.

Existe no entanto uma formulação distinta para calcular a dissipação de energia por *whitecapping* no modelo SWAN. Esta formulação, baseada no trabalho de Alves e Banner (2003), está directamente relacionada com valores de *whitecapping* obtidos experimentalmente, e que relaciona a taxa de dissipação de energia com fenómenos hidrodinâmicos não lineares dentro dos grupos de ondas (Westhuysen *et al.*, 2007):

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -C_{ds} \left(\frac{B(k)}{B_r} \right)^{p/2} (\tanh(kh))^{(2-p_0)/4} \sqrt{gk} E(\sigma, \theta) \quad (1.40)$$

sendo B_r um limite de confiança definido experimentalmente e $B(k)$ obtido através do integral:

$$B(k) = \int_0^{2\pi} c_g k^3 E(\sigma, \theta) d\theta \quad (1.41)$$

No caso de $B(k) > B_r$, irá ocorrer rebentação e o exponencial p é alterado para um valor de calibração pré-definido. No caso de $B(k) \leq B_r$, não existe rebentação, mas poderá ser necessário existir alguma dissipação de energia. De forma a obtermos uma transição mais suave em torno do ponto de inflexão ($B(k) = B_r$) Alves e Banner (2003) apresentaram uma formulação de transição:

$$p = \frac{p_0}{2} + \frac{p_0}{2} \tanh \left[10 \left(\sqrt{\frac{B(k)}{B_r}} - 1 \right) \right] \quad (1.42)$$

A diferença primordial entre a formulação apresentada por Westhuysen *et al.* (2007) e as formulações defendidas por Komen *et al.* (1984) e Janssen (1991), é que esta formulação não está directamente dependente da declividade da onda, mas sim do número de onda. Esta formulação também possui uma formulação de crescimento das ondas por acção do vento distinta, apresentada por Yan (1987).

O atrito de fundo está descrito no SWAN através de três formulações distintas: a formulação empírica obtida na experiência JONSWAP (Hasselmann *et al.*, 1973), o modelo de Collins (1972) e o modelo de viscosidade turbulenta de Madsen *et al.* (1988). Estas formulações são baseadas na expressão:

$$S_{ds,b} = -C_b \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) \quad (1.43)$$

sendo C_b um coeficiente de atrito de fundo, que depende do movimento junto ao fundo U_{rms} :

$$U_{rms}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (1.44)$$

Hasselmann *et al.* (1973), através dos resultados da experiência JONSWAP apresentaram um valor do coeficiente igual a $C_b = C_{JON} = 0.038 \text{m}^2 \text{s}^{-3}$ para condições de *swell*. Mais tarde Bouws e Komen (1973) apresentaram um novo valor para este coeficiente ($C_{JON} = 0.067 \text{m}^2 \text{s}^{-3}$), considerando uma situação de estado de mar completamente desenvolvido em zonas de profundidade reduzida. Collins (1972) apresentou uma formulação base para calcular o coeficiente de atrito de fundo, $C_b = C_f g U_{rms}$ sendo $C_f = 0.015$. Madsen *et al.* (1988) apresentaram uma formulação similar às apresentadas por Hasselmann *et al.* (1973) e Collins (1972), mas o seu modelo depende da rugosidade de fundo e das condições de agitação. Este coeficiente de atrito de fundo é expressado por:

$$C_b = f_w \frac{g}{\sqrt{2}} U_{rms} \quad (1.45)$$

sendo f_w um parâmetro adimensional obtido por:

$$\frac{1}{4\sqrt{f_w}} + \log_{10}\left(\frac{1}{4\sqrt{f_w}}\right) = m_f + \log_{10}\left(\frac{a_b}{K_N}\right) \quad (1.46)$$

na qual Madsen *et al.* (1988) consideram $m_f = -0.08$ e a_b sendo obtido através da seguinte expressão:

$$a_b^2 = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (1.47)$$

Em situações em que a_b/K_N seja inferior a 1.57, o valor do coeficiente de atrito é considerado $f_w = 0.30$.

A rebentação induzida pelo fundo, está definida no SWAN através do modelo de rebentação apresentado por Battjes e Janssen (1978). Neste modelo a dissipação de energia por unidade de área (D_{tot}), devida à rebentação é definida por:

$$D_{tot} = -\frac{1}{4} \alpha_{BJ} Q_b \left(\frac{\tilde{\sigma}}{2\pi}\right) H_{max}^2 = \alpha_{BJ} Q_b \tilde{\sigma} \frac{H_{max}^2}{8\pi} \quad (1.48)$$

na qual $\alpha_{BJ} = 1$ e Q_b é a fracção de ondas para as quais ocorre rebentação, definida por:

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_{max}^2} \quad (1.49)$$

sendo H_{max} a altura de onda máxima que poderá existir a uma determinada profundidade. A fracção de ondas para as quais ocorre a rebentação devido à profundidade (Q_b), pode ser obtida através de:

$$Q_b = \begin{cases} 0, & \text{para } \beta \leq 0.2 \\ Q_0 - \beta^2 \frac{Q_0 - \exp(Q_0 - 1)/\beta^2}{\beta^2 - \exp(Q_0 - 1)/\beta^2}, & \text{para } 0.2 < \beta < 1 \\ 1, & \text{para } \beta \geq 1 \end{cases} \quad (1.50)$$

where $\beta = H_s/H_{max}$.

O valor da altura máxima para a qual não existe rebentação (H_{max}), é definida

por $H_m = \gamma d$, na qual d representa a profundidade e γ representa o parâmetro de rebentação. Existem neste momento, muitas aproximações para o valor deste parâmetro, obtido com base na variação do declive do fundo ou através da declividade da onda. O valor mais consensual é de 0.73, tendo sido apresentado por Battjes e Janssen (1978), sendo que estudos mais recentes apresentam o valor de 0.79 como uma melhor aproximação (Holthuijsen, 2007).

Apesar do modelo SWAN continuar em constante evolução, e de ter sido desenvolvido com as formulações mais avançadas que existem nesta área de investigação, não existe ainda um número de trabalhos significativo, que nos permita entender a sensibilidade dos resultados do modelo a variações nos parâmetros de calibração, ou validações extensivas para diferentes condições ambientais de aplicação. O modelo foi validado inicialmente (Ris *et al.*, 1999) para diferentes ambientes, incluindo um tanque de ondas artificial, um lago de *fetch* limitado e alguns ambientes costeiros de baixa energia, mas de elevada complexidade fenomenológica. Depois do trabalho inicial de Ris *et al.* (1999), os trabalhos apresentados posteriormente dão ênfase a um determinado parâmetro físico (Winterwerp *et al.* (2007), van Vledder (2006), Tolman (2002b), Rogers *et al.* (2002)), a situações com condições ambientais excepcionais (Ou *et al.* (2002)) ou apenas pretendem validar um sistema de previsão (Dykes *et al.* (2009), Rusu *et al.* (2008b), Rogers *et al.* (2007), Sansana Silva *et al.* (2009)). Este trabalho nasce exactamente da necessidade de calibrar e validar o modelo SWAN para a nossa costa, uma vez que as calibrações e validações realizadas até ao momento são bastante simples, sendo normalmente utilizado o modelo com os parâmetros que possui por defeito.

1.3 Metodologia de Calibração Inversa

Os modelos computacionais que pretendem descrever um determinado fenómeno possuem, na sua grande maioria, uma série de parâmetros que permitem a sua calibração, de forma a que se obtenham melhores resultados para determinadas condições ambientais. Estes parâmetros são normalmente definidos através da comparação com resultados experimentais, observações realizadas no campo, ou da comparação com resultados de outros modelos já previamente calibrados. No entanto, caso ocorram alterações significativas nas condições ambientais, os parâmetros previamente definidos poderão já não ser os mais indicados para a simulação em causa. Neste caso será necessário realizar uma nova calibração dos parâmetros, o que acarreta realizar um grande número de simulações e muito tempo de análise posterior. Com o intuito de simplificar este processo foram criadas algumas ferramentas que realizam este processo de forma automática, tentando minimizar uma função objectivo, de forma descrever o distanciamento entre os resultados do modelo e os dados experimentais, com os quais se realizam as comparações.

De uma forma geral, o processo de calibração *manual* (tentativa e erro) é exactamente igual ao processo de calibração inversa. Em ambos os casos, configurações, formulações ou valores paramétricos, são ajustados até conseguirmos obter uma diferença mínima entre os valores observados e os resultados do modelo. A grande diferença entre as duas abordagens, que normalmente é referida como a principal vantagem da modelação inversa, é o facto desta metodologia encontrar de forma automática os valores dos parâmetros que melhor descrevem os resultados esperados. Além disso as calibrações por tentativa e erro podem levantar mais alguns problemas, uma vez que não existem garantias que os parâmetros encontrados sejam os mais adequados para a experiência em causa, uma vez que poderá não existir uma análise rigorosa das correlações entre parâmetros, da sua variância e erros residuais, além de se tornar, em muitos casos, impeditiva em termos computacionais.

Na metodologia de calibração inversa, é definida *à priori* uma função objectivo(Φ), que corresponde ao somatório da variância entre os resultados do modelo e os dados de observações. Quanto menor for este valor, melhor será a calibração dos respectivos parâmetros. A Figura 1.6 descreve, de uma forma ilustrativa, a evolução desta função objectivo, num espaço de dois parâmetros distintos. A caixa a azul representa as condicionantes físicas dos parâmetros, ou seja, caso os valores dos parâmetros sejam superiores aos valores que a caixa delimita, estes deixam de ser válidos em

termos físicos. Assim sendo, é necessário realizar uma análise preliminar de cada parâmetro, descrevendo os valores que poderão assumir. Uma boa definição dos limites dos parâmetros permite também diminuir o número de corridas do modelo necessárias, limitando a busca a valores que possuam validade física na descrição do fenómeno em causa. A elipse no centro a vermelho, representa o espaço dos parâmetros para os quais a função objectivo se encontra no seu mínimo. Este facto demonstra que não existe apenas uma solução para cada parâmetro, uma vez que em diferentes conjugações podemos obter o mesmo resultado da minimização do erro, com diferentes calibrações.

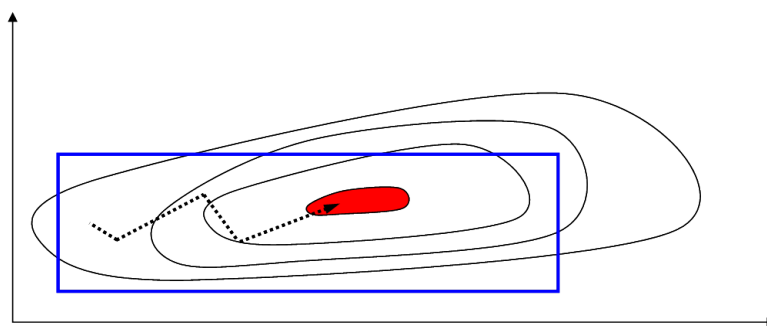


Figura 1.6: Representação de uma função objectivo num espaço bi-paramétrico. A caixa a azul representa os limites físicos dos parâmetros e a elipse a vermelho representa os valores dos parâmetros para os quais o modelo se encontra devidamente calibrado. A seta indica a evolução dos parâmetros até atingir o mínimo da função objectivo.

De forma a realizar a calibração inversa do modelo SWAN, foi utilizado o software de calibração Model Independent Calibration and Uncertainty Analysis Toolbox (MICUT), desenvolvido por Skahill *et al.* (2009). Este modelo tem por base o algoritmo de Levenberg-Marquardt (LM) e pode ser utilizado na resolução de problemas de mínimos quadrados não lineares. Este software utiliza as formulações implementadas no modelo de calibração PEST (Doherty, 2004), possuindo no entanto algumas modificações na forma de cálculo do novo vector de parâmetros, o que lhe permite otimizar o processo de calibração.

A formulação de LM descreve a relação entre parâmetros e os resultados do modelo, como uma função M que pode ser descrita num espaço de n parâmetros e m resultados de observação. Utilizando os parâmetros que por defeito são introduzidos no SWAN (p_0), os respectivos resultados do modelo (c_0) podem ser representados por:

$$c_0 = M(p_0) \quad (1.51)$$

Podemos então gerar um conjunto de resultados c , obtidos utilizando um vector de parâmetros p , que apenas difere ligeiramente de p_0 :

$$c = c_0 + J(p - p_0) \quad (1.52)$$

sendo J a matriz Jacobiana de M , ou seja, a matriz constituída por m linhas (número de observações), sendo cada um dos n elementos de cada linha as derivadas de uma observação em particular, em relação a um determinado parâmetro. Assim sendo, é-nos possível obter um novo vector de parâmetros, para o qual, os resultados obtidos sejam o mais próximo possível das observações, definindo a função objectivo como:

$$\Phi = (c - c_0 - J(p - p_0))^t Q (c - c_0 - J(p - p_0)) \quad (1.53)$$

sendo Q uma matriz diagonal, em que os seus valores q_{ii} correspondem ao balanço dos valores residuais e correspondendo o sobrescrito t à notação de matriz transposta. Ou seja, quando estamos a utilizar resultados de grandezas diferentes, neste caso a altura significativa (m) e o período (s), e sabendo que estes valores possuem magnitudes diferentes, esta diferença iria repercutir-se nos resultados. De forma a permitir a utilização de diferentes grupos de resultados, cada valor q_{ii} corresponde a:

$$q_{ii} = \sum_{i=1}^m (w_i r_i)^2 \quad (1.54)$$

sendo que w_i corresponde ao inverso da variância ($1/\sigma^2$) e r_i corresponde ao valor residual ($c - c_0$). Desta forma é nos possível calcular o novo parâmetro p :

$$p = p_0 + u \quad (1.55)$$

sendo o vector de actualização u obtido através da minimização da equação (1.53):

$$u = (J^t Q J)^{-1} J^t Q (c - c_0) \quad (1.56)$$

Marquardt (1963) e Levenberg (1944) introduziram um novo parâmetro (α) na equa-

ção (1.56), de forma a minimizar o fenómeno de “*hemstitching*”², permitindo assim uma melhoria na obtenção dos parâmetros de calibração mais adequados à minimização da função objectivo. A equação (1.56) passará então a ser definida por:

$$u = (J^t Q J + \alpha I)^{-1} J^t Q (c - c_0) \quad (1.57)$$

sendo α o parâmetro de Marquardt e I a matriz identidade com $m \times n$ elementos.

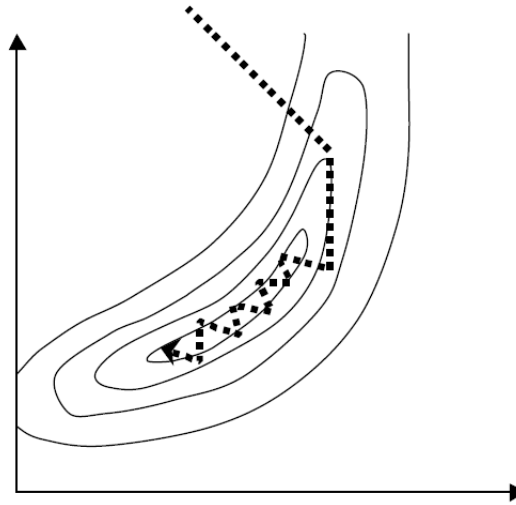


Figura 1.7: Representação do fenómeno de “*hemstitching*”. Adaptado de Doherty (2004).

Com uma implementação do método de LM e utilizando o modelo de previsão dos nossos resultados como uma “caixa-negra”, no qual apenas possuímos os resultados das modelações, não nos é possível calcular derivadas para preencher a matriz J , sendo que esta matriz apenas poderá ser preenchida por diferenciação numérica, criando ligeiras perturbações (na ordem de 1%) na matriz original. No modelo PEST, esta operação requer um número de corridas do modelo entre m e $2m$, por cada iteração de optimização. No entanto existem métodos mais expeditos no preenchimento da matriz J , tal como o método de Broyden (1965), que é utilizado no modelo MICUT. Este método, baseado numa secante do método LM, é dado por:

$$J_{final} = J + \frac{[y - Js]s^t}{s^t s} \quad (1.58)$$

² Quando a região de resultados pretendidos representa um intervalo reduzido é possível que os vectores de parâmetros calculados não permitam obter resultados dentro deste intervalo, *saltando* de um lado para o outro sem nunca atingir o objectivo (Figura 1.7).

sendo que y representa o vector de dimensão n , obtido através da diferença entre os resultados obtidos com o actual vector de parâmetros e os obtidos com vector de parâmetros anterior. A diferença entre o vector de parâmetros actual e o vector de parâmetros anterior é representado por s . Utilizando este método apenas é necessário realizar uma chamada do modelo em cada iteração de calibração.

Tal como está representado na Figura 1.6 não é considerada apenas uma única solução para o problema. Sabendo que Φ_{min} será o valor das observações, poderemos criar um espaço de resultados válidos através de $\Phi_{min} + \delta$, sabendo que δ assume valores relativamente pequenos, quando comparados com as observações. Assim sendo, todos os resultados dentro deste espaço, são considerados como válidos para calibrar o modelo. De forma a encontrar um valor de δ adequado, será necessário realizar uma análise de sensibilidade dos parâmetros, o que neste caso já é realizado de forma automática pelo MICUT. No entanto será possível definir δ através de:

$$\delta = n\sigma^2 F_\alpha(n, m - n) \quad (1.59)$$

sendo que σ^2 representa a variância, n representa o número de parâmetros, m o número de observações e F_α representa o valor da distribuição F no nível de probabilidade de $1 - \alpha$.

1.4 Área de Estudo

A área de estudo deste trabalho encontra-se localizada na zona Noroeste da Costa Portuguesa, sendo delimitada pelas latitudes $41^{\circ} 00'N$ e $42^{\circ} 15'N$. O limite Oeste é aproximadamente definido pela fronteira da plataforma continental, estando fixado na longitude $9^{\circ} 24'W$. A Figura 1.8 apresenta uma representação batimétrica da área envolvente e permite analisar a sua localização numa escala regional.

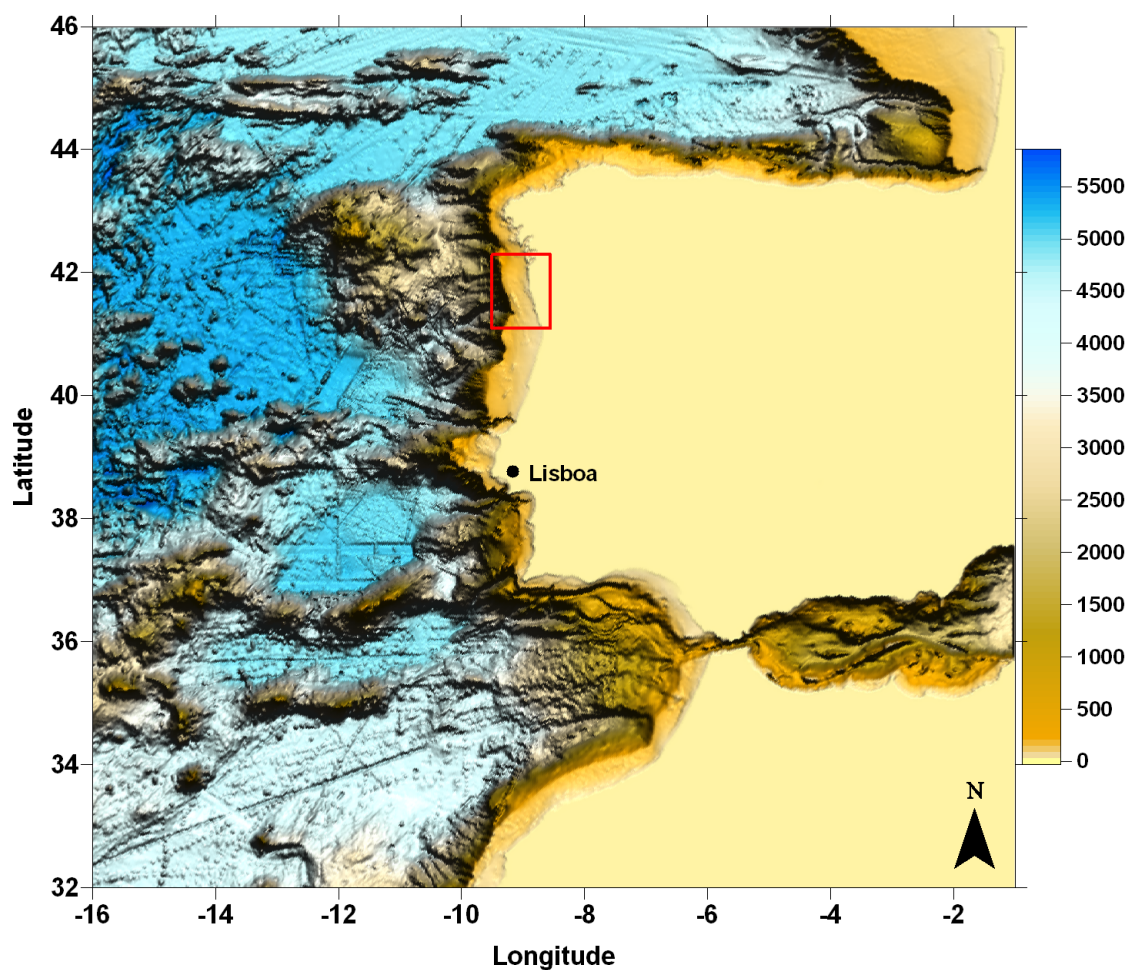


Figura 1.8: Representação batimétrica da Costa Portuguesa e localização da área de estudo, assinalada pelo retângulo a vermelho.

Esta área apresenta um perfil batimétrico regular, com as batimétricas orientadas de uma forma geral em paralelo com a linha de costa e com um declive não muito acentuado. Não apresenta grandes acidentes geomorfológicos, excepção feita pelo Canhão Submarino do Porto, que apenas se individualiza a mais de 30 km da costa,

já em profundidades sem influência sobre as ondas de superfície. Esta zona possui uma plataforma continental estreita, com extensões entre 30 e 45 km, sendo a sua fronteira bem definida por uma vertente continental com um declive bastante pronunciado (Dias, 1987). A sua constituição de fundo é marcadamente dominada por sedimentos arenosos, sendo no entanto possível observar alguns afloramentos rochosos e algumas áreas dominadas por sedimentos mais finos (Dias *et al.*, 2002). A Figura 1.9 apresenta uma representação batimétrica da área envolvente em maior detalhe, bem como a localização das bóias ondógrafo utilizadas neste estudo.

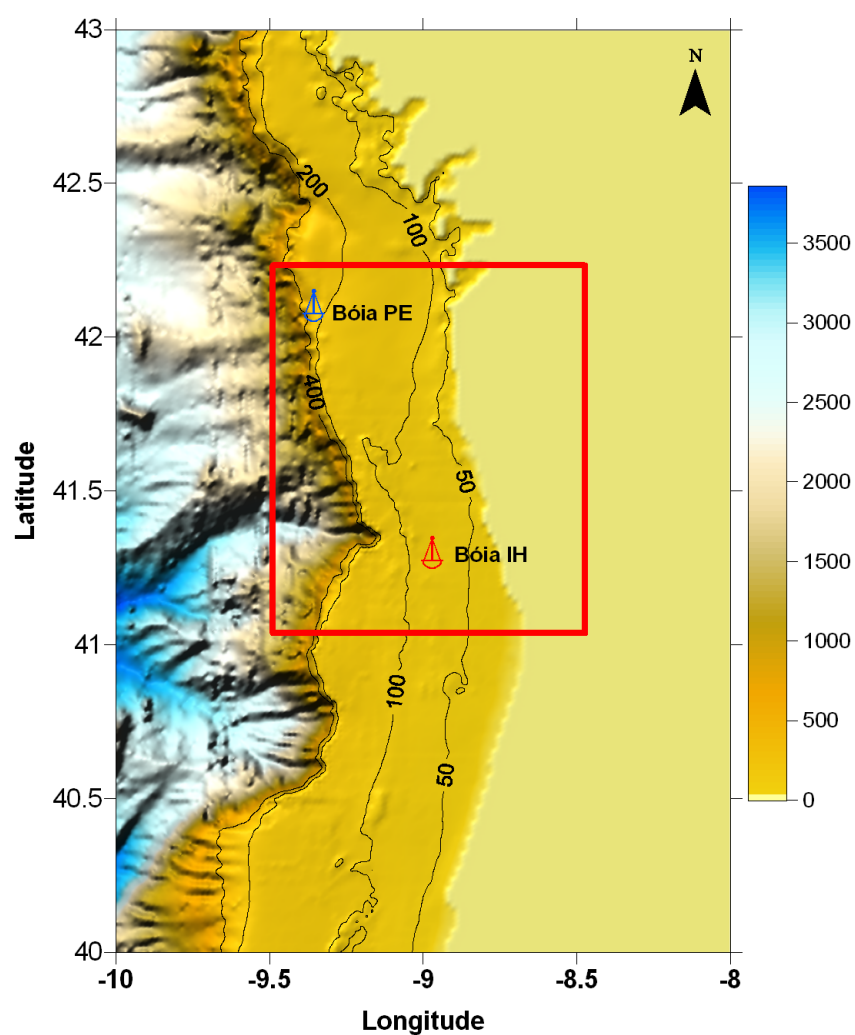


Figura 1.9: Representação batimétrica da área de estudo, assinalada através do rectângulo a vermelho. Localização das bóias utilizadas neste trabalho: Bóia PE (Puertos del Estado) e Bóia IH (Instituto Hidrográfico).

1.5 Caracterização do Clima de Agitação Marítima

A costa ocidental Portuguesa está completamente exposta à agitação gerada no Atlântico Norte sendo por isso caracterizada por ondas de baixa frequência e de elevada altura significativa, associadas à geração em locais afastados do ponto de observação. A circulação atmosférica no Atlântico Norte impõe maioritariamente três tipos distintos de agitação, caracterizados principalmente pela sua direcção de incidência:

- Direcções de incidência de Noroeste e Oeste: representam a maioria das observações realizadas. Estas situações são impostas pela presença do anticiclone dos Açores sobre o arquipélago ou pela presença de uma depressão estacionária a Norte da Península Ibérica. Este tipo de agitação é responsável pela maioria dos eventos extremos observados, sendo caracterizada por frequências mais baixas e alturas mais elevadas, representativas de situações de *swell*.
- Direcção de incidência de Norte: situação que normalmente ocorre no período estival, caracterizada por ondas de frequência mais elevada e altura mais reduzida. Este tipo de situações são normalmente impostas pelo deslocamento para Este do anticiclone dos Açores e pela presença de uma depressão localizada no centro da Península Ibérica.
- Direcção de incidência de Sudoeste: situações típicas de Inverno, associadas a aproximações de superfícies frontais frias ou a depressões quase estacionárias localizadas a Sudoeste da Península Ibérica. São caracterizadas por ondas de período intermédio, mas que no entanto atingem alturas elevadas com bastante frequência.

Costa e Esteves (2008) realizaram uma caracterização das condições de agitação da Costa Oeste Portuguesa, com base nas observações obtidas nas estações ondógrafo de Leixões e Sines, para o período compreendido entre Julho de 1996 e Setembro de 2008. A direcção dominante para a zona de Leixões é a direcção de incidência de Noroeste, com 72% das observações, sendo que a direcção de incidência Oeste apresenta 24% dos registos, a direcção Sudoeste apresenta 3% e a direcção de incidência Norte registou cerca de 1% das observações. Quanto à altura significativa, esta região apresenta um valor médio de 2 metros, sendo que a classe entre 1 e 2 metros é a mais representada com 45% das observações. A classe entre 3 e 5 metros apresenta

17% dos registos, enquanto que foram observados valores superiores a 5 metros em 2% das observações. O período de pico dominante encontra-se igualmente distribuído entre as classes 9 – 11 segundos e 11 – 13 segundos, com aproximadamente 30% dos registos em cada uma das classes, enquanto que a classe 13 – 15 segundos representa 15% dos registos.

Os eventos extremos (valores de altura significativa superior a 3.5 metros durante um período mínimo de 12 horas consecutivas) encontrados neste registo possuem maioritariamente direcções de incidência do quadrante Noroeste (86%), apresentando, na maioria dos casos, alturas significativas distribuídas entre as classes 4 – 5 metros e 5 – 6 metros. Foram registados, ao longo deste período, 19 casos em que as alturas significativas apresentam valores superiores a 7 metros.

É também notória a existência de uma sazonalidade nos resultados apresentados, com os valores mais elevados de altura significativa a serem maioritariamente registados nos meses de Inverno.

Capítulo 2

Metodologia

De forma a realizar a calibração do modelo espectral de previsão de agitação SWAN, foi utilizada uma metodologia de calibração inversa através do modelo MICUT, descrito na secção 1.3. Tal como referido na secção 1.2, o modelo SWAN apresenta diferentes formulações para descrever os distintos fenómenos físicos que promovem alterações no campo de agitação. Este trabalho tem como objectivo calibrar o modelo na fase de transferência de águas profundas para águas costeiras, sendo por isso apenas analisados os parâmetros e formulações que possuem influência directa nos resultados neste tipo de situações. Assim sendo, todos os processos de transformação da onda em zonas de baixa profundidade, tais como, a rebentação induzida pelo fundo, difracção e interacções não lineares entre grupos de três ondas não estão incluídos no plano de calibração.

A metodologia implementada baseia-se na análise dos processos de transformação do campo de agitação entre um ponto em águas profundas, que nos servirá como condição de fronteira do modelo e a comparação dos resultados do modelo com dados observacionais obtidos numa localização em águas costeiras. Como condição de fronteira, foram utilizados os dados obtidos através da bóia ondógrafo de Cabo Silleiro (Bóia PE - Figura 1.9). Esta estação ondógrafo Seawatch, é mantida pelos Puertos del Estado e os dados são disponibilizados no sítio da internet desta instituição (www.puertos.es). Esta estação ondógrafo, localiza-se na posição $42^{\circ} 7.2'N$ / $9^{\circ} 24.0'W$ (WGS84), a uma profundidade de aproximadamente 320 metros. Para realizar a comparação com os resultados do modelo, foram utilizados as observações da bóia ondógrafo de Leixões, mantida pelo Instituto Hidrográfico (Bóia IH - Figura 1.9). Esta estação ondógrafo Datawell de águas pouco profundas, encontra-se

localizada na posição $41^{\circ} 19.0' N / 8^{\circ} 59.0' W$ (WGS84), a uma profundidade de aproximadamente 80 metros.

De forma a possuir uma série de dados suficientemente abrangente, com diversos episódios de elevada energia, bem como situações menos energéticas, foi seleccionado um período de 44 dias, durante o qual obtivemos uma medição por hora, o que perfaz 1057 observações, em ambas as posições acima referidas.

Não existe, até ao momento, para a Costa Portuguesa um conjunto de dados que possua medições realizadas *offshore* e em zonas costeiras, sob a influência directa do mesmo campo de agitação. Neste momento o Instituto Hidrográfico encontra-se na fase de implementação de uma rede de estações multiparamétricas de águas profundas, o que poderá ser bastante útil neste tipo de trabalhos num futuro próximo.

Desta forma, torna-se necessário encontrar uma situação em que possamos obter dados que nos permitam realizar esta calibração com um grau de certeza elevado, apesar de não existir à partida, uma grande variabilidade ao longo da zona Norte da Costa Oeste Portuguesa. Assumindo que, se estivermos sob a influência de um campo de agitação com direcções de incidência do quadrante Norte/Noroeste (que representa a incidência dominante nesta região - ver Secção 1.5), podemos assumir que as ondas medidas pela estação de Cabo Silleiro, serão de forma bastante aproximada, as ondas que posteriormente serão medidas na estação de Leixões. Esta constatação parte do pressuposto que não existe qualquer tipo de barreiras ou estruturas que possam influenciar a agitação, visto que as duas zonas são bastante similares em termos de morfologia de fundo, extensão da plataforma e profundidades (Secção 1.4). Caso a agitação possua direcções de incidência marcadamente de Sul, poderá ser bastante problemático para esta abordagem, uma vez que a influência deste tipo de situações poderá ser dominante na zona de Leixões e o mesmo não ocorrer na zona de Cabo Silleiro.

O período analisado, com início a 22 de Janeiro de 2009 e termo a 7 de Março de 2009, foi seleccionado não só pela evolução da altura significativa (Figura 2.1) e período de pico medidos (Figura 2.2), mas também pela direcção de pico medida (Figura 2.3), apresentando na maioria das observações (cerca de 90%) valores correspondentes ao quadrante pretendido (Norte - Noroeste).

Após ter sido determinado o período de análise acima referido, foi construída uma corrida modelo, baseada no modelo SWAN (versão 4072ABCD). Para esta corrida, foi estabelecida uma área delimitada a norte e a oeste pela posição da bóia de Cabo

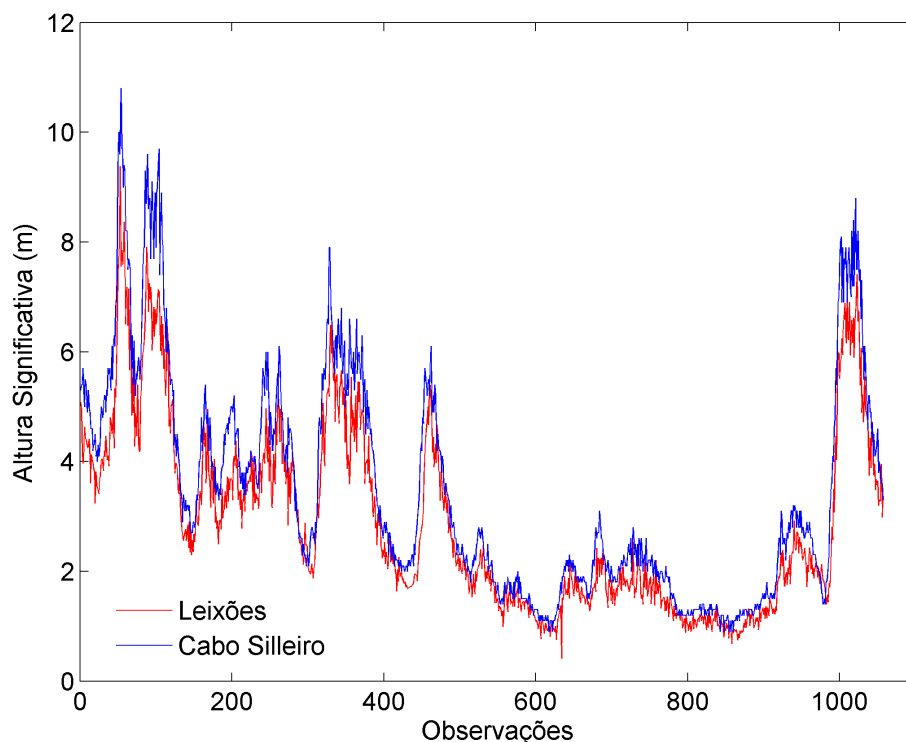


Figura 2.1: Gráfico da evolução da altura significativa medida nas estações ondógrafo de Cabo Silleiro e de Leixões

Silleiro e a sul determinou-se um limite de aproximadamente 0.3° graus a sul da posição da bóia de Leixões, de forma a evitar qualquer problema de proximidade do limite da grelha computacional (flutuações numéricas impostas pela fronteira), tal como é apresentado na Figura 1.9. Esta grelha computacional, composta por 200×200 pontos, possui uma resolução espacial de 500 metros e utiliza uma batimetria com uma resolução espacial de 250 metros. Para estas simulações foi criada uma grelha do campo de ventos, realizada a partir do modelo ALADIN, mantido pelo Instituto de Meteorologia, com uma resolução temporal de 1 hora e uma resolução espacial de aproximadamente 8500 metros.

As condições de fronteira utilizadas pelo modelo são as observações realizadas na bóia de Cabo Silleiro, com uma resolução temporal de 1 hora e que se encontra localizada no canto Noroeste da grelha computacional (Figura 1.9).

Tal como referido anteriormente, este trabalho tem como objectivos calibrar o modelo SWAN para zonas de transição entre águas profundas e zonas de águas costeiras e comprovar a viabilidade da utilização da metodologia de calibração inversa para

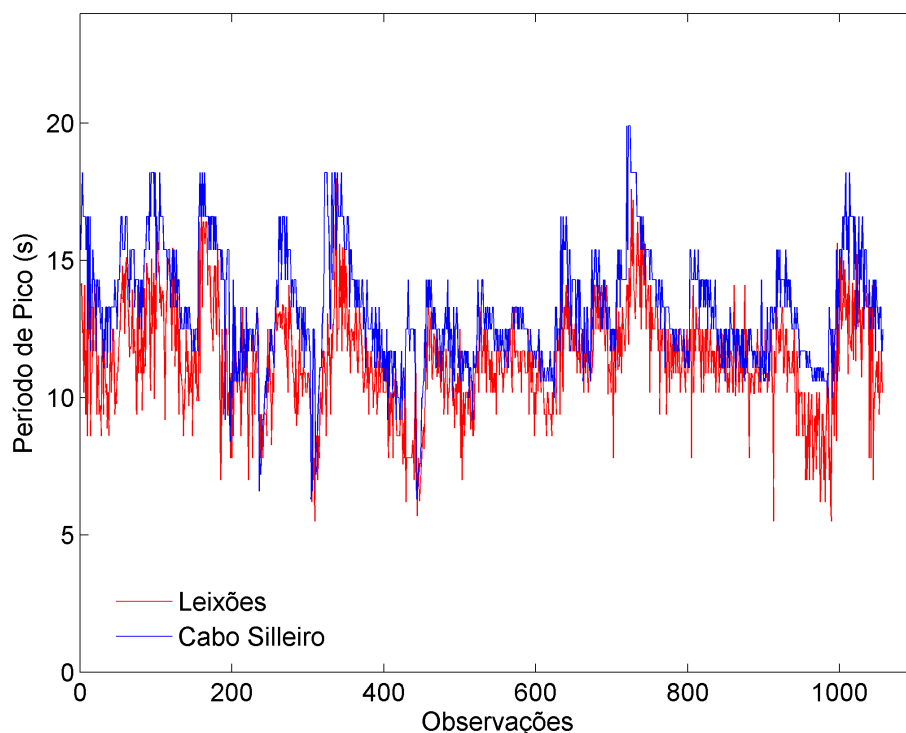


Figura 2.2: Gráfico da evolução do período de pico medido nas estações ondógrafo de Cabo Silleiro e de Leixões

este efeito. Como tal, foram definidos um conjunto de parâmetros que possuem maior relevo na evolução dos resultados para este tipo de condições. Desta forma, optou-se por analisar a variação dos resultados, em virtude da alteração das formulações e respectivos parâmetros de quatro mecanismos físicos distintos:

- A geração de ondas por acção do vento
- *whitecapping*
- O atrito de fundo
- As interacções não lineares entre grupos de quatro ondas - *quadruplets*.

Para a geração de ondas por acção do vento foram utilizadas as formulações disponíveis no modelo: Komen *et al.* (1984), Janssen (1989,1991a) e Westhuysen *et al.* (2007). O *whitecapping* está directamente relacionado com a formulação utilizada para descrever a geração de ondas por acção do vento, possuindo por isso uma formulação específica para cada uma das formulações acima apresentadas. Para

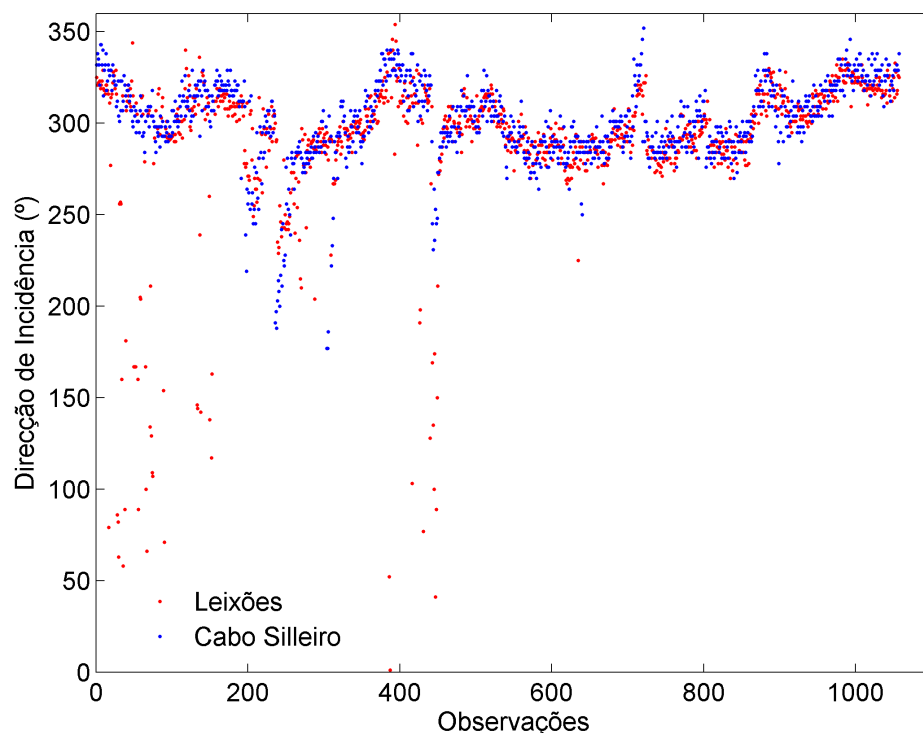


Figura 2.3: Gráfico da evolução da direcção de incidência medido nas estações ondógrafo de Cabo Silleiro e de Leixões. Estes valores são apresentados em graus, medidos no sentido dos ponteiros do relógio a partir do Norte Geográfico.

descrever o atrito de fundo foram utilizadas também três formulações: JONSWAP (Hasselmann *et al.*, 1973), Collins (1972) e Madsen *et al.* (1988). Para os *quadruplets* apenas foi utilizada a formulação DIA (*Discrete Interaction Approximation*), uma vez que as restantes formulações ainda se encontram em fase de desenvolvimento. A conjugação destas diversas formulações, originou nove combinações distintas, que podem ser descritas através da Tabela 2.1.

Cada uma destas configurações anteriormente apresentada, foi sujeita a um processo de calibração por metodologia inversa, aplicada através do modelo MICUT. Assim sendo foram seleccionados para cada configuração os parâmetros que poderiam ser calibrados e atribuídos os valores pré-definidos, sugeridos no manual do SWAN (The SWAN Team, 2008b).

Posteriormente foi criado um intervalo de variação para cada um dos parâmetros, impondo assim uma limitação à variação dos parâmetros imposta pelo modelo MICUT. Na Tabela 2.2 são apresentados os valores pré-definidos e os respectivos intervalos de variação.

Tabela 2.1: Configurações utilizadas nas simulações, apresentando as diferentes formulações para a geração de ondas por acção do vento e para o atrito de fundo.

Corrida	Geração			Atrito de Fundo		
	Komen	Janssen	Westhuysen	Madsen	Collins	JONSWAP
A	•			•		
B	•				•	
C	•					•
D		•		•		
E		•			•	
F		•				•
G			•	•		
H			•		•	
I			•			•

Assim sendo foram analisadas nove configurações distintas e calibrados oito parâmetros. Para o modo de geração de ondas por acção do vento foi calibrado o parâmetro de Cavaleri e Malanotte-Rizzoli (a_{cm}), que é comum a todas as configurações. Para a formulação de Komen *et al.* (1984) foi calibrado o parâmetro $C_{ds-komen}$, enquanto que para a formulação de Janssen (1991) foram calibrados os parâmetros $C_{ds-janssen}$ e δ . Por opção da equipa responsável pelo modelo SWAN, para a formulação de Westhuysen *et al.* (2007), não é possível realizar qualquer ajuste aos parâmetros relativos à componente exponencial da geração de ondas por acção do vento ou ao *whitecapping*.

Tabela 2.2: Valores pré-definidos (iniciais) para cada parâmetro e os seus intervalos de variação.

Parâmetro	Inicial	Mínimo	Máximo
a_{cm}	0.0015	0.001	0.002
$C_{ds-komen}$	2.36×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-3}
$C_{ds-janssen}$	17.0	10	20
δ	0.5	0	1
$C_{jonswap}$	0.067	0	0.1
$C_{collins}$	0.015	0.005	0.03
C_{madsen}	0.05	0.01	0.2
λ	0.25	0.1	0.9

Para as formulações de atrito de fundo foram ajustados os parâmetros C_{jonswap} para a formulação de JONSWAP (Hasselmann *et al.*, 1973), o parâmetro C_{collins} para a formulação de Collins (1972) e o parâmetro C_{madsen} para a formulação de Madsen *et al.* (1988). Para as interações entre grupos de quatro ondas (*quadruplets*) apenas foi calibrado o parâmetro λ . No entanto alguns dos parâmetros sofreram alguns ajustes nos valores pré-definidos, que posteriormente serão descritos no Capítulo 4.

Capítulo 3

Resultados

De forma a validar os resultados obtidos após a calibração do modelo, foi realizada uma comparação com os dados da bóia ondógrafo de Leixões, antes e depois da calibração, tal como referido anteriormente. Com o intuito de obter uma análise quantitativa das alterações obtidas pela calibração com o modelo MICUT, foram analisados alguns parâmetros estatísticos, tais como o erro quadrático médio (RMSE), enviesamento (*bias*), coeficiente de correlação (R) e o declive da recta de regressão linear (m) de melhor ajuste aos dados.

Além destes parâmetros foi também analisado o *scatter index* (SI), utilizado de forma a quantificar o desempenho do modelo (Komen *et al.*, 1994). Este parâmetro, que na realidade representa o RMSE normalizado com os valores de observação, permite-nos compreender a capacidade do modelo de representar as condições de agitação de forma coerente, uma vez que este parâmetro representa uma normalização do RMSE com a altura significativa. O modelo pode apresentar um erro quadrático médio (RMSE) de 0.4 metros, o que será um valor bastante aceitável, no entanto, caso a altura média seja 0.8 m, o *scatter index* apresentará um valor de 50%, o que na realidade representa um mau resultado. Sendo X os valores obtidos através do SWAN e Y os valores medidos na bóia ondógrafo de Leixões:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2} \quad (3.1)$$

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^n ((X_i - Y_i))}{n} \quad (3.2)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) (Y_i - \bar{Y})}{\left(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (3.3)$$

$$m = \frac{\overline{XY}}{\overline{X^2}} \quad (3.4)$$

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{Y}} \quad (3.5)$$

Na Tabela 3.1 são apresentados os resultados dos parâmetros estatísticos referidos anteriormente para as configurações que correspondem à formulação de Komen (ver Tabela 2.1). Os resultados obtidos estão separados por parâmetro estatístico analisado (RMSE, R, m, S e *bias*), por objecto de análise (Altura Significativa ou Período de Pico) e por calibração (*calibrado* - calibração com que se obteve os melhores resultados (menor RMSE); *inicial* - configuração do modelo com os parâmetros pré-definidos).

Para a formulação de Komen, obteve-se uma melhoria bastante significativa na altura significativa (passamos de um RMSE de 0.8 metros para 0.3 metros) para todas as formulações de atrito de fundo. Além disso o *scatter index* (SI) passou de 28% para 12%, representando esta uma redução para metade do valor inicial. Nos restantes parametros obtivemos uma melhoria similar, com excepção do valor do coeficiente de correlação que se manteve praticamente constante.

Na Tabela 3.2 são apresentados os resultados da análise estatística para a formulação de Janssen com as diferentes formulações de atrito de fundo (Figura 3.1).

Tabela 3.1: Análise estatística dos resultados para as configurações correspondentes à formulação de Komen.

Komen				
Altura Significativa		A	B	C
RMSE (m)	<i>calibrado</i>	0.36	0.36	0.37
	<i>inicial</i>	0.80	0.80	0.82
R	<i>calibrado</i>	0.98	0.98	0.98
	<i>inicial</i>	0.98	0.98	0.98
m	<i>calibrado</i>	1.00	1.02	1.02
	<i>inicial</i>	1.18	1.18	1.18
SI (%)	<i>calibrado</i>	12.48	12.47	12.63
	<i>inicial</i>	27.77	27.72	28.33
<i>bias</i> (m)	<i>calibrado</i>	0.09	0.12	0.14
	<i>inicial</i>	0.73	0.73	0.74

Período de Pico		A	B	C
RMSE (s)	<i>calibrado</i>	2.38	2.38	2.37
	<i>inicial</i>	2.39	2.39	2.38
R	<i>calibrado</i>	0.63	0.63	0.63
	<i>inicial</i>	0.63	0.63	0.63
m	<i>calibrado</i>	1.14	1.14	1.14
	<i>inicial</i>	1.14	1.14	1.14
SI (%)	<i>calibrado</i>	21.19	21.27	21.14
	<i>inicial</i>	21.14	21.16	21.05
<i>bias</i> (s)	<i>calibrado</i>	1.72	1.73	1.71
	<i>inicial</i>	1.70	1.71	1.69

Após a calibração com a formulação de Janssen não se obtiveram melhorias significativas nos resultados, tanto para a altura significativa como para o período de pico. Como se pode observar pela Tabela 3.2 obtivemos uma ligeira melhoria no RMSE, bem como nos restantes parâmetros estatísticos, mas não podemos classificar os resultados como positivos, uma vez que ainda continuamos com um *scatter index* bastante elevado (cerca de 20%).

Os resultados obtidos com esta formulação merecem um olhar mais atento, uma vez que existiam à partida várias condicionantes que nos impossibilitam de obter melhores resultados com a calibração. Estes factos serão discutidos de forma mais aprofundada no capítulo destinado à discussão dos resultados (Capítulo 4).

Na Tabela 3.3 são apresentados os resultados da análise estatística para a formulação

Tabela 3.2: Análise estatística dos resultados para as configurações correspondentes à formulação de Janssen.

Janssen				
Altura Significativa		D	E	F
RMSE (m)	<i>calibrado</i>	0.57	0.60	0.60
	<i>inicial</i>	0.62	0.64	0.63
R	<i>calibrado</i>	0.96	0.96	0.96
	<i>inicial</i>	0.96	0.96	0.96
m	<i>calibrado</i>	1.07	1.08	1.08
	<i>inicial</i>	1.08	1.10	1.09
SI (%)	<i>calibrado</i>	19.88	20.72	20.72
	<i>inicial</i>	21.55	22.08	21.74
<i>bias</i> (m)	<i>calibrado</i>	0.35	0.39	0.39
	<i>inicial</i>	0.40	0.43	0.41

Período de Pico		D	E	F
RMSE (s)	<i>calibrado</i>	2.43	2.45	2.45
	<i>inicial</i>	2.49	2.49	2.53
R	<i>calibrado</i>	0.62	0.62	0.62
	<i>inicial</i>	0.61	0.60	0.61
m	<i>calibrado</i>	1.13	1.14	1.14
	<i>inicial</i>	1.13	1.14	1.14
SI (%)	<i>calibrado</i>	21.89	21.65	21.65
	<i>inicial</i>	21.98	21.99	22.38
<i>bias</i> (s)	<i>calibrado</i>	1.65	1.70	1.70
	<i>inicial</i>	1.63	1.69	1.75

de Westhuysen com as diferentes formulações de atrito de fundo. Para a formulação de Westhuysen, também não foi possível melhorar significativamente os resultados do SWAN. As melhorias aqui são pouco significativas, mas importa referir que os resultados desta formulação com os parâmetros iniciais já são bastante positivos, tal como se pode observar pelo *scatter index* e RMSE. No entanto é notória a melhoria no *bias*, tendo esta calibração melhorado bastante a distribuição dos valores do modelo, tendo sido possível obter um valor de declive da recta de regressão linear igual a 1, o que demonstra uma correcta distribuição dos valores ao ajuste.

Esta formulação é, neste momento, a que tem sofrido um maior desenvolvimento pela equipa responsável pelo SWAN. Desta forma já seria espectável que obtivéssemos melhores resultados iniciais e que a calibração fosse menos eficaz. Estes factos serão

Tabela 3.3: Análise estatística dos resultados para as configurações correspondentes à formulação de Westhuysen.

Westhuysen				
Altura Significativa		G	H	I
RMSE (m)	<i>calibrado</i>	0.35	0.35	0.35
	<i>inicial</i>	0.37	0.37	0.36
R	<i>calibrado</i>	0.98	0.98	0.98
	<i>inicial</i>	0.98	0.98	0.98
m	<i>calibrado</i>	1.00	1.02	1.01
	<i>inicial</i>	1.02	1.03	1.02
SI (%)	<i>calibrado</i>	12.26	12.25	12.16
	<i>inicial</i>	12.74	12.74	12.58
<i>bias</i> (m)	<i>calibrado</i>	0.05	0.09	0.07
	<i>inicial</i>	0.11	0.13	0.12

Período de Pico		G	H	I
RMSE (s)	<i>calibrado</i>	2.37	2.37	2.37
	<i>inicial</i>	2.40	2.38	2.37
R	<i>calibrado</i>	0.64	0.63	0.63
	<i>inicial</i>	0.64	0.63	0.64
m	<i>calibrado</i>	1.14	1.14	1.14
	<i>inicial</i>	1.14	1.14	1.14
SI (%)	<i>calibrado</i>	21.14	21.11	20.99
	<i>inicial</i>	21.21	21.08	20.98
<i>bias</i> (s)	<i>calibrado</i>	1.71	1.71	1.70
	<i>inicial</i>	1.72	1.71	1.70

abordados em maior pormenor no Capítulo 4.

De forma a exemplificar de forma mais clara as evoluções obtidas através da calibração serão apresentadas algumas figuras que permitem uma análise mais abrangente dos resultados.

Na Figura 3.1 são apresentados os gráficos de dispersão da altura significativa (H_s) com a formulação de Komen. Esta figura apresenta os resultados obtidos com as diferentes configurações, após a calibração e com os parâmetros de iniciais.

As melhorias apresentadas na Tabela 3.1 são bastante evidentes ao observarmos os gráficos de dispersão para esta formulação. Apesar de continuar a existir uma ligeira sobrestimação das alturas significativas, existe uma melhor concordância nos resul-

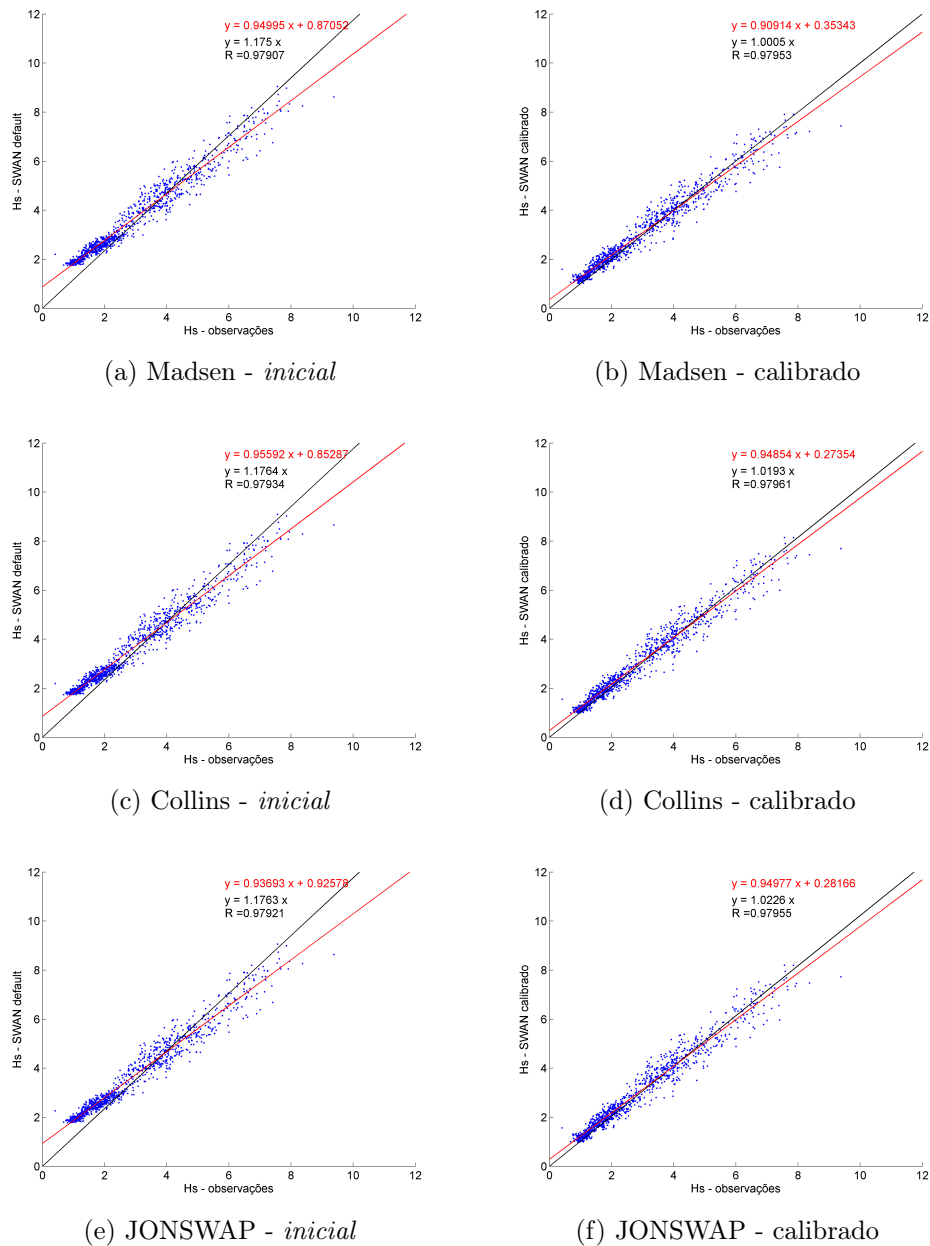


Figura 3.1: Diagramas de dispersão para as diferentes configurações com a formulação de Komen. São apresentadas as equações da rectas de regressão linear obtidas para a distribuição dos pontos, passando pela origem (a preto) e a recta de melhor ajuste não passando pela origem (a vermelho).

tados, tal como apresentado pelos valores de *bias* e do declive da recta de regressão linear. Na Figura 3.2 são apresentados os gráficos de dispersão para os resultados obtidos para a formulação de Janssen, após a calibração e com os parâmetros iniciais. Tal como já tinha sido referido na Tabela 3.2, os resultados demonstram que o mo-

delo sobrevaloriza de forma constante os resultados, nunca conseguindo aproximar-se de forma muito significativa das observações, em todas as configurações.

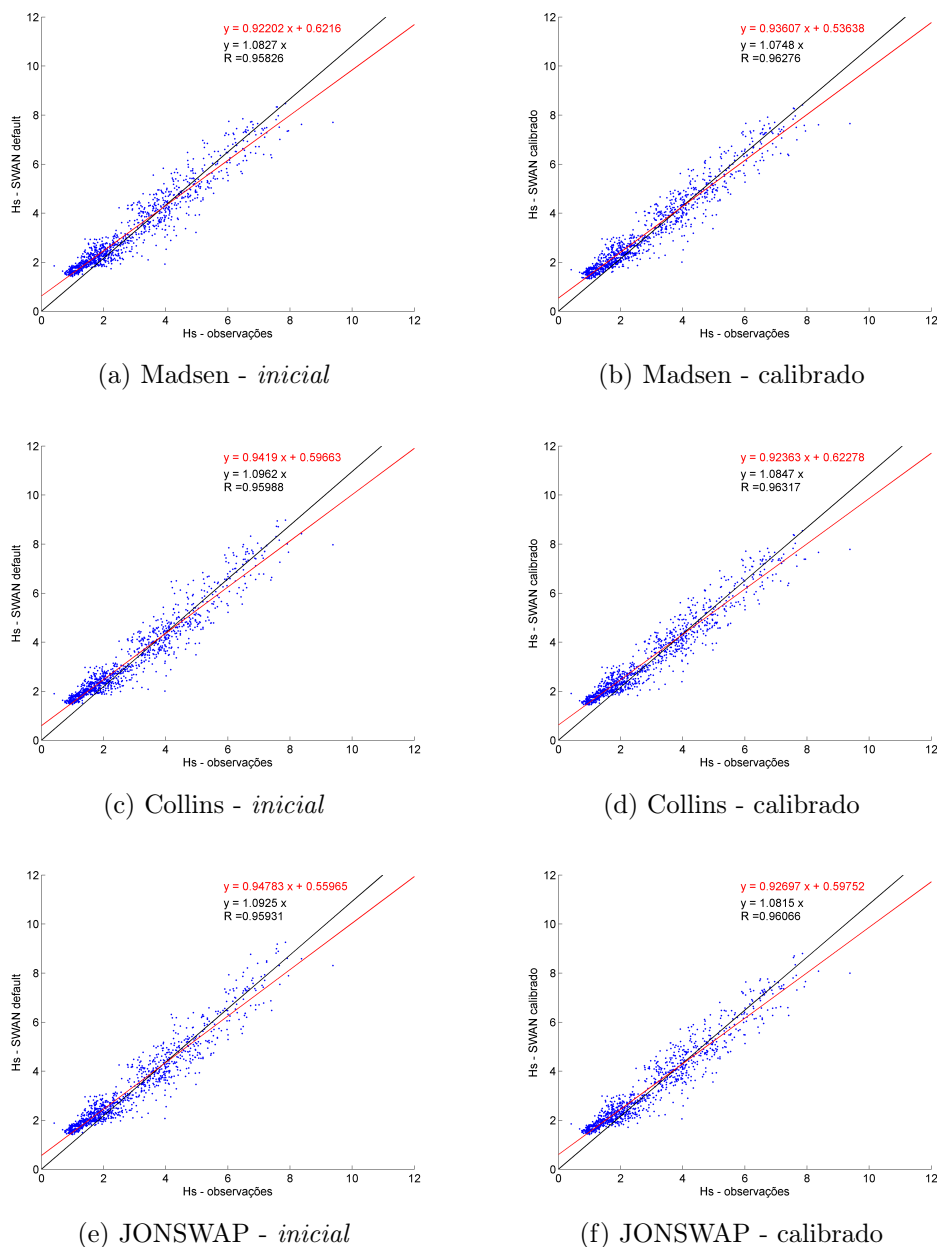


Figura 3.2: Diagramas de dispersão para as diferentes configurações com a formulação de Janssen. São apresentadas as equações da rectas de regressão linear obtidas para a distribuição dos pontos, passando pela origem (a preto) e a recta de melhor ajuste não passando pela origem (a vermelho).

Na Figura 3.3 são apresentados os gráficos de dispersão para os resultados obtidos com as diferentes configurações, após a calibração e com os parâmetros iniciais, para

a formulação de Westhuysen. Nesta figura é possível constatar a simetria entre os resultados do modelo e as observações, mesmo previamente à calibração.

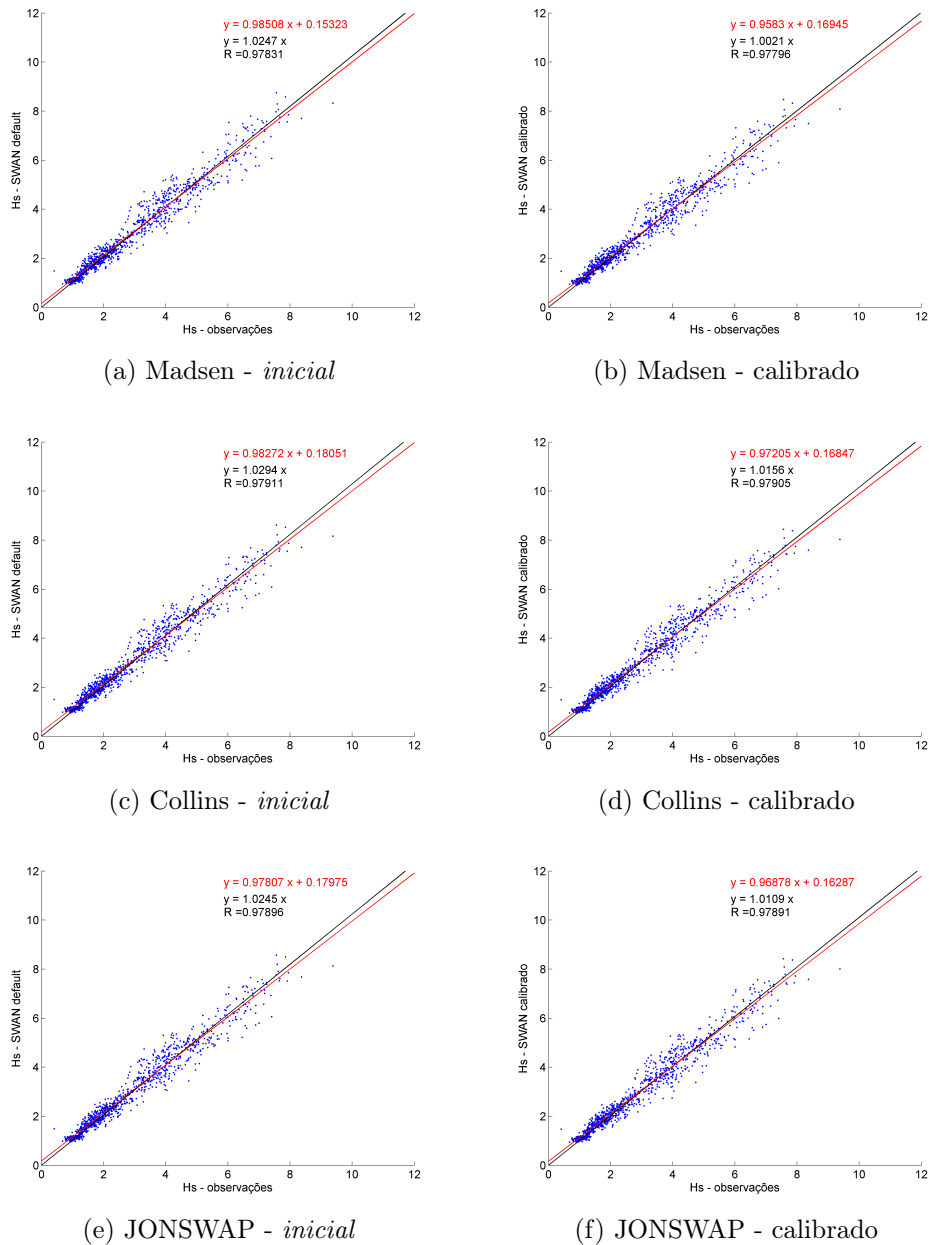


Figura 3.3: Diagramas de dispersão para as diferentes configurações com a formulação de Westhuysen . São apresentadas as equações da rectas de regressão linear obtidas para a distribuição dos pontos, passando pela origem (a preto) e a recta de melhor ajuste não passando pela origem (a vermelho).

Analisar os resultados no espaço temporal da corrida, permite-nos obter algumas conclusões sobre a capacidade do modelo de se ajustar às condições do meio e da sua

respectiva melhoria através da calibração. Os resultados obtidos para a formulação de Komen, vêm por sua vez, comprovar a melhoria obtida com a calibração. Nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6 é apresentado a evolução temporal (ao longo dos 44 dias de modelação, que correspondem às 1057 observações horárias) dos resultados do modelo (após a calibração e com os parâmetros iniciais) com as observações obtidas através da bóia ondógrafo de Leixões, sendo notória a diferença existente entre as observações e os resultados do modelo anterior à calibração, facto que é ultrapassado após uma correcta calibração.

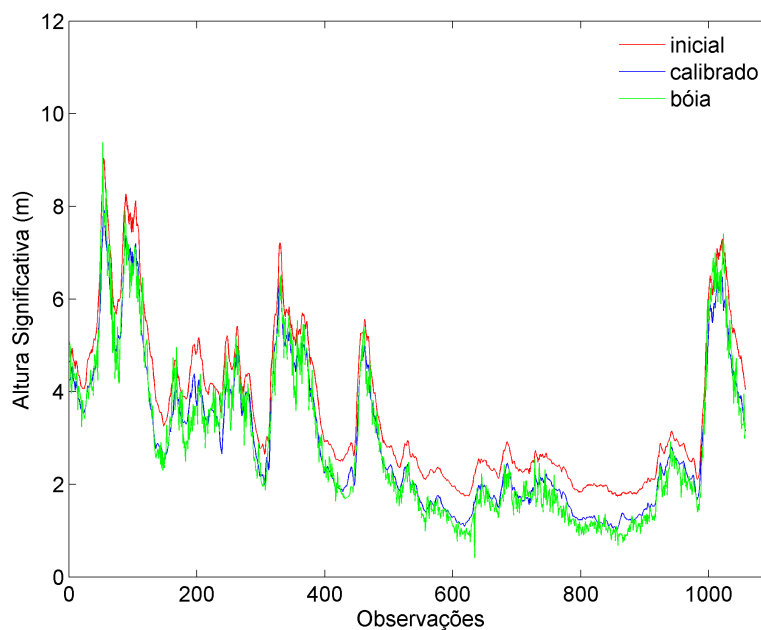


Figura 3.4: Comparação das observações com os resultados da altura significativa, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Komen - Madsen.

Nestas figuras evidenciam-se principalmente as diferenças entre os resultados e as observações em situações de menor altura significativa. Convém referir, que estas situações, são normalmente dominadas por uma agitação de frequência mais elevada, imposta por sistemas de geração local. Por outro lado, os episódios de maior amplitude evidenciam a entrada de ondulação, de baixa frequência, proveniente de fora do nosso sistema, e são razoavelmente bem representados pelo modelo, mesmo na fase pré-calibração.

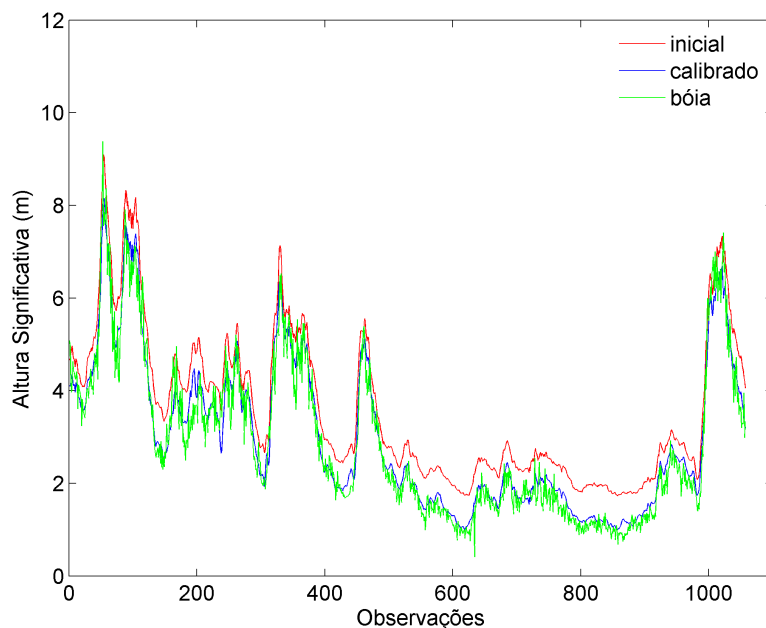


Figura 3.5: Comparação das observações com os resultados da altura significativa, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Komen - Collins.

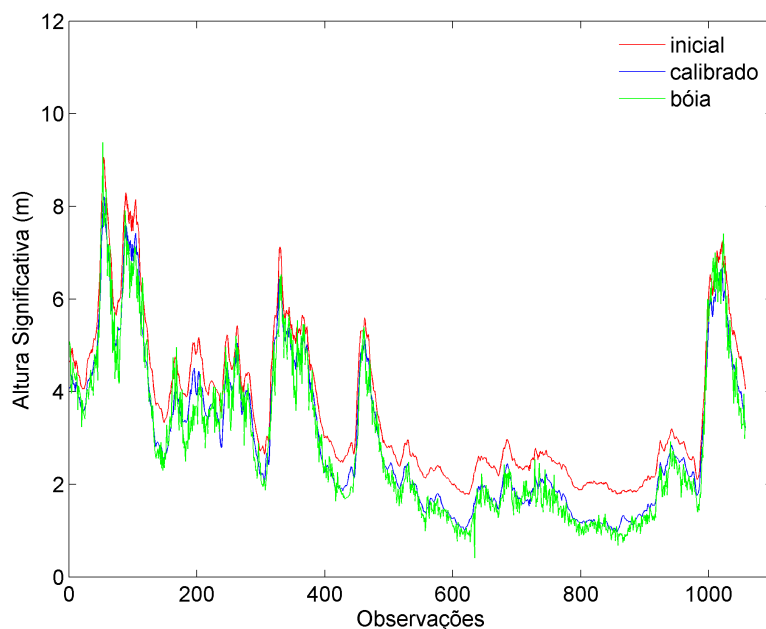


Figura 3.6: Comparação das observações com os resultados da altura significativa, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Komen - JONSWAP.

Nas Figuras 3.7, 3.8 e 3.9 é apresentada a mesma evolução temporal, mas neste caso para as corridas correspondentes à formulação de Janssen. Nestas figuras é notória a

sobrestimação dos resultados, facto também já demonstrado através dos parâmetros estatísticos anteriormente analisados.

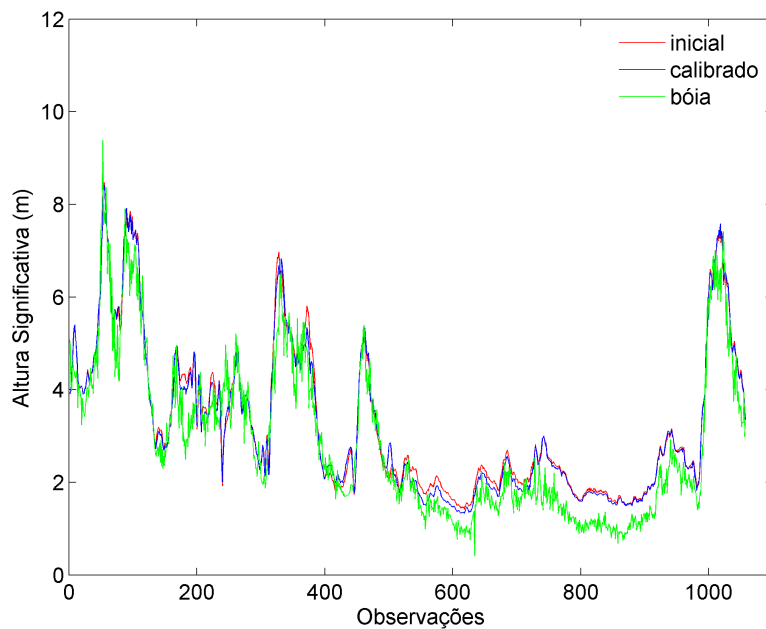


Figura 3.7: Comparação das observações com os resultados da altura significativa, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Janssen - Madsen.

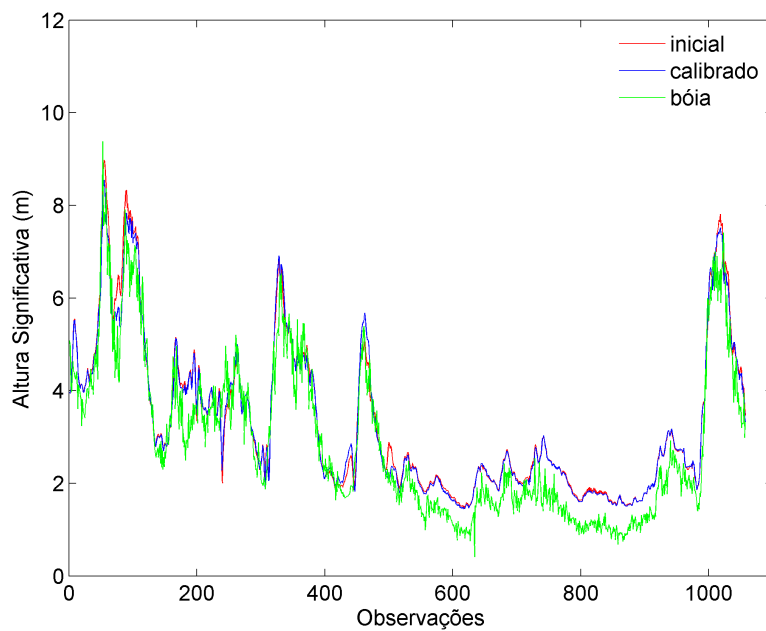


Figura 3.8: Comparação das observações com os resultados da altura significativa, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Janssen - Collins.

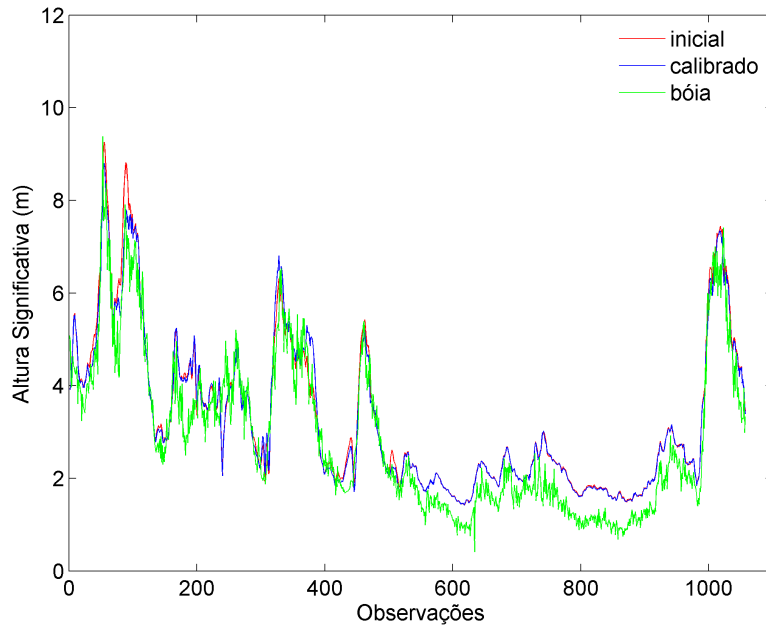


Figura 3.9: Comparação das observações com os resultados da altura significativa, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Janssen - JONSWAP.

Por seu lado, para a formulação de Westhuysen, os resultados obtidos pelo modelo, seguem de forma bastante coerente as observações obtidas pela bóia. Nas Figuras 3.10, 3.11 e 3.12 é possível constatar a concordância dos resultados com as observações, para as diferentes configurações, existindo uma diminuta diferença entre o modelo calibrado e com os parâmetros iniciais.

Esta formulação consegue acompanhar de forma bastante exacta a evolução das condições de agitação, passando de condições totalmente dominadas por geração local, que constituem os períodos de altura significativa mais reduzida, para episódios de elevada energia, associados à entrada de *swell* no sistema. Esta capacidade de evolução torna-se vital para descrever as condições de agitação neste tipo de áreas, em que a presença de sistemas de ondas de origens diferentes é bastante recorrente.

Será importante referir, que os resultados obtidos com as diferentes formulações de atrito de fundo são bastante similares. Este facto prende-se com a profundidade a que foram realizadas as observações, uma vez que em profundidades mais elevadas a interacção entre as ondas de superfície e o fundo é diminuta, reduzindo assim a contribuição do atrito de fundo para evolução do campo de agitação.

Uma análise importante também é a evolução do RMSE ao longo das corridas. Neste

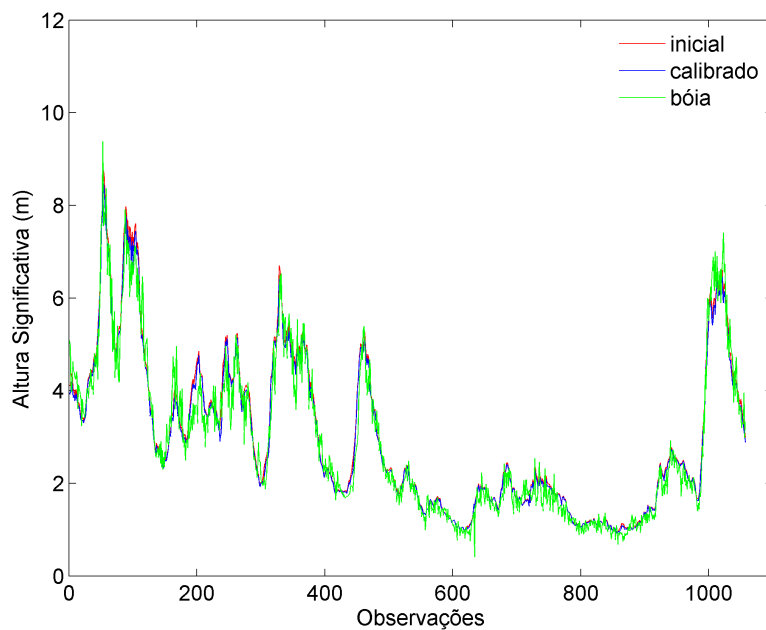


Figura 3.10: Comparação das observações com os resultados da altura significativa, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Westhuysen - Madsen.

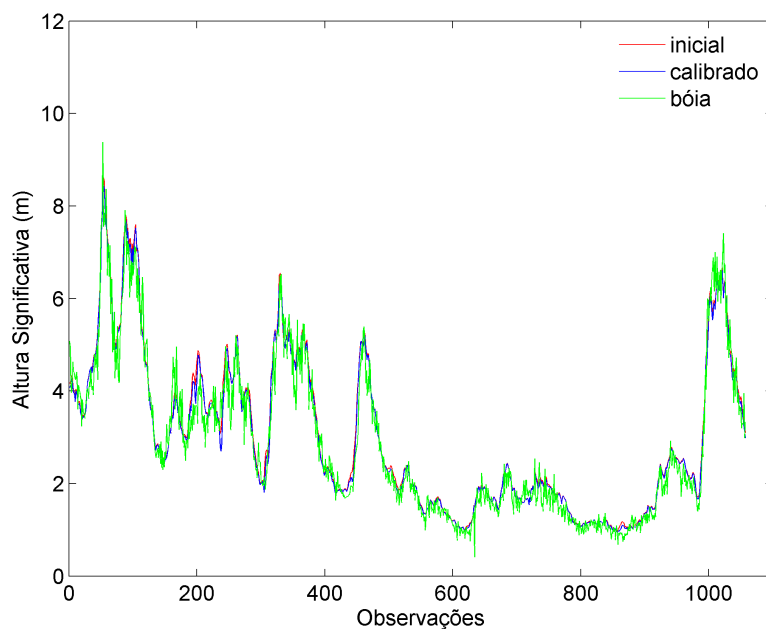


Figura 3.11: Comparação das observações com os resultados da altura significativa, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Westhuysen - Collins.

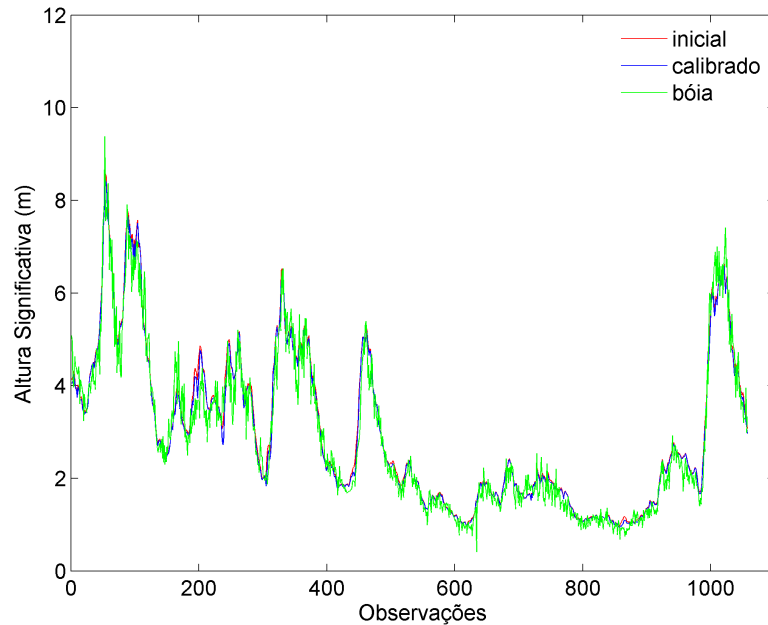


Figura 3.12: Comparação das observações com os resultados da altura significativa, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Westhuysen - JONSWAP.

caso é notória a evolução nas corridas com a formulação Komen, nas quais existe um decréscimo acentuado do erro ao longo da evolução da calibração, ao passo que, nas configurações Janssen e Westhuysen, esta variação não é muito acentuada, tal como é apresentado nas Figuras 3.13, 3.14 e 3.15.

No caso das calibrações para a formulação de Komen (Figura 3.13), é notória a evolução do processo de calibração. Após uma primeira análise da sensibilidade do modelo, à variação de cada um dos parâmetros, o modelo MICUT assume uma rota no espaço paramétrico e efectua um salto bastante significativo ao aumentar o parâmetro referente ao *whitecapping* ($C_{ds-komen}$).

No caso da análise da evolução do erro para a formulação de Janssen (Figura 3.14) é possível identificar a dificuldade do modelo em obter um caminho a seguir. Ao alterar um dos parâmetros obtinha um resultado mais próximo do pretendido, mas que era automaticamente anulado pela alteração do parâmetro seguinte. Esta evolução assemelha-se a uma dificuldade nos processos de calibração, já referida anteriormente como “*hemstitching*”, sendo que neste caso os resultados ainda se encontram bastante afastados da zona do objectivo, no espaço paramétrico. Para a formulação de Westhuysen não existe grande variação do RMSE. Importa também referir que

no caso desta formulação, não ocorre variação do parâmetro associado ao *whitecap-ping*, sendo que nas restantes formulações, este parâmetro foi o que apresentou uma maior influência sobre os resultados do modelo.

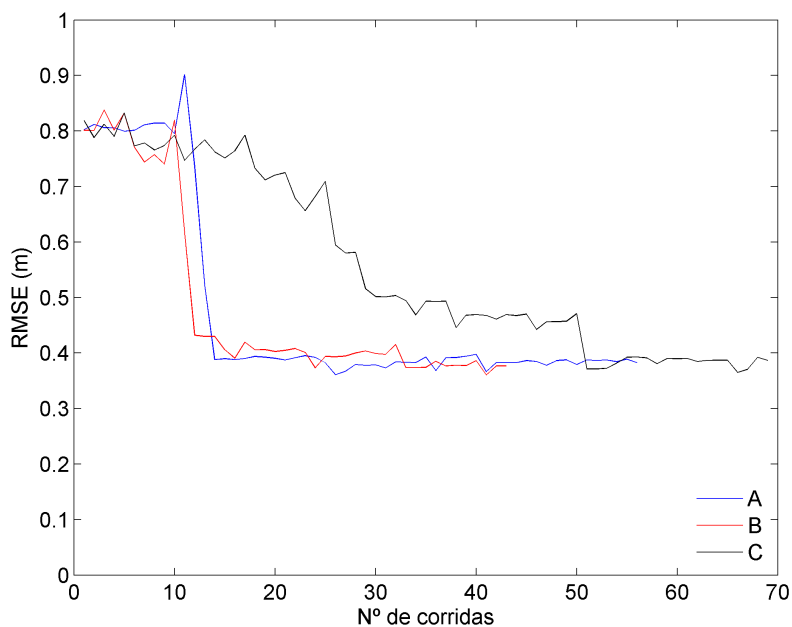


Figura 3.13: Variação do RMSE ao longo do processo de calibração, referente à altura significativa, para as diferentes configurações com a formulação de Komen.

Tal como é possível verificar através dos resultados apresentados nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3, a calibração não foi eficaz para as observações do período. Assim sendo não será relevante apresentar todas as figuras respeitantes a esta análise, uma vez que representam uma série de repetições de resultados. Assim sendo, apenas serão apresentadas as figuras referentes às comparações das observações com os resultados do modelo para as corridas A, D e G (Figuras 3.16, 3.17 e 3.18) além da Figura 3.19, que mostra uma análise da variação do RMSE para todas as corridas, onde é possível verificar, a pequena variação obtida com as calibrações.

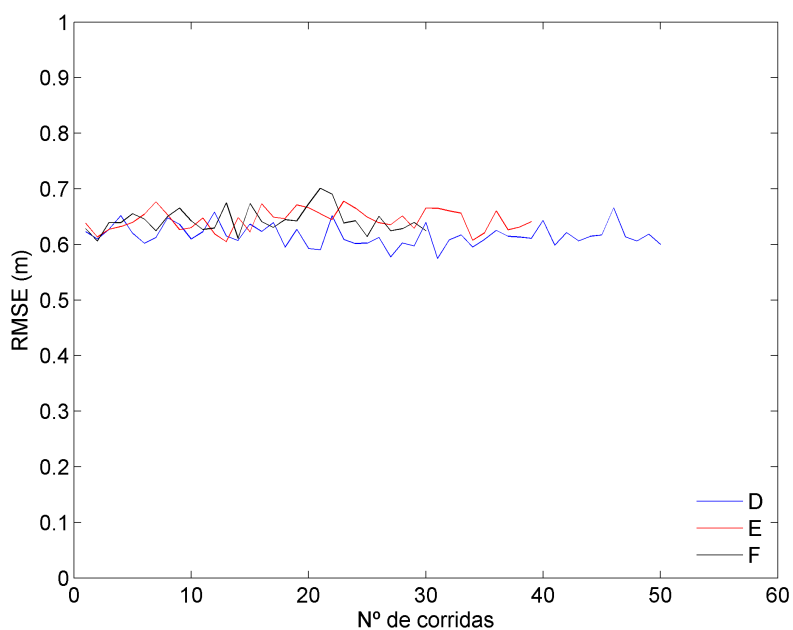


Figura 3.14: Variação do RMSE ao longo do processo de calibração, referente à altura significativa, para as diferentes configurações com a formulação de Janssen.

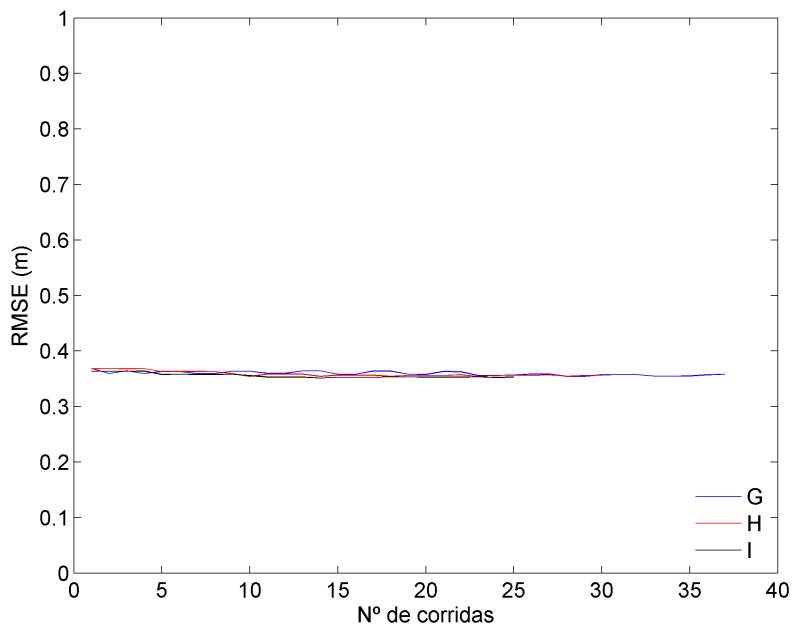


Figura 3.15: Variação do RMSE ao longo do processo de calibração, referente à altura significativa, para as diferentes configurações com a formulação de Westhuysen.

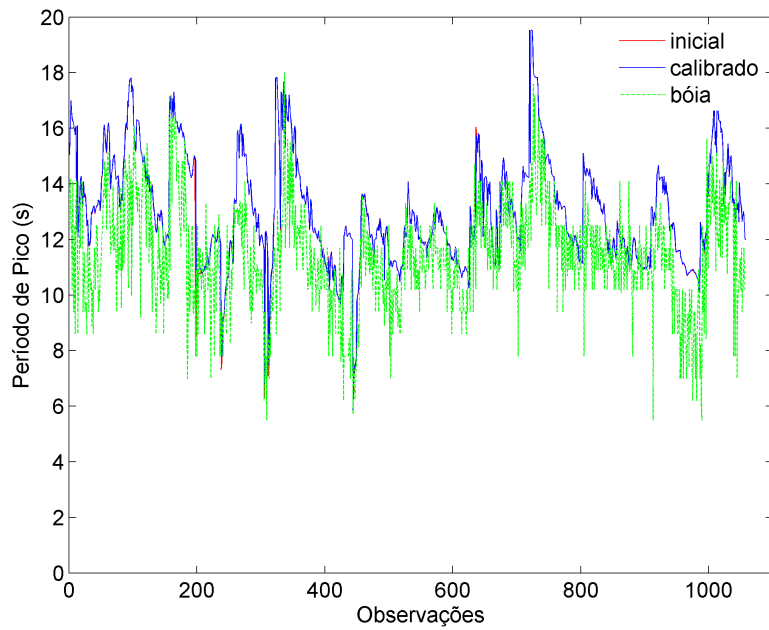


Figura 3.16: Comparação das observações com os resultados do período de pico, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Komen - Madsen.

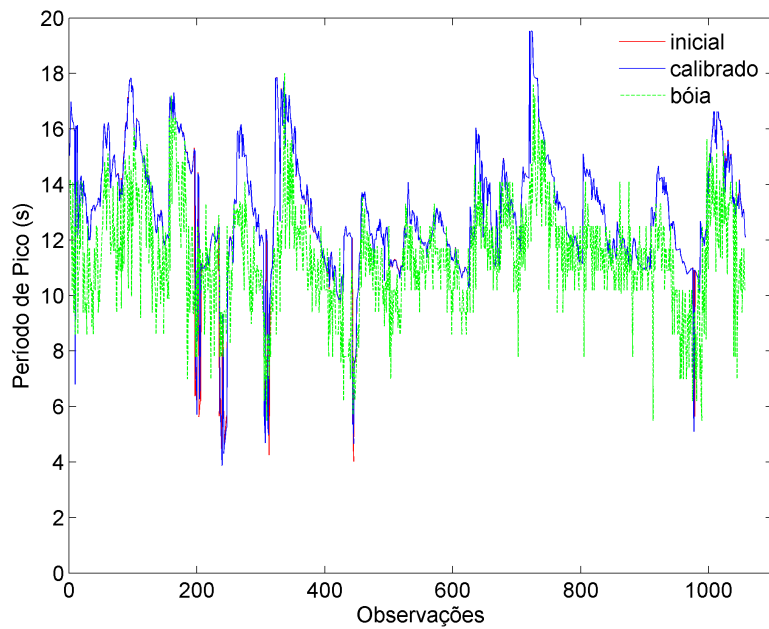


Figura 3.17: Comparação das observações com os resultados do período de pico, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Janssen - Madsen.

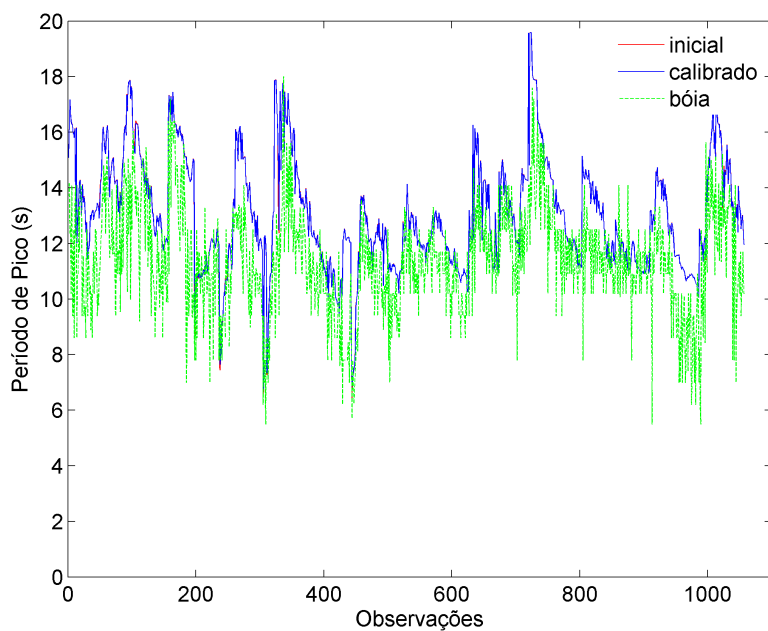


Figura 3.18: Comparação das observações com os resultados do período de pico, previamente e posteriormente à calibração, para a configuração Westhuysen - Madsen.

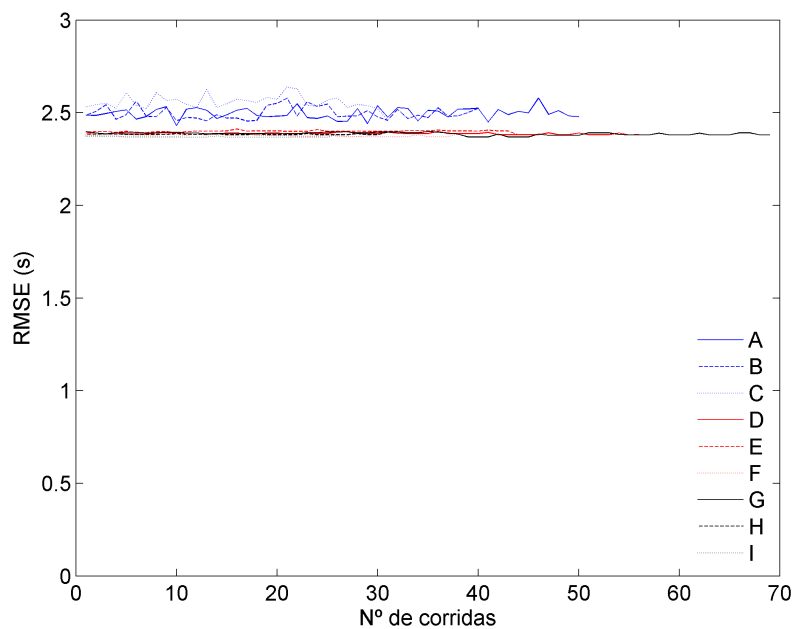


Figura 3.19: Variação do RMSE referente ao período de pico, para as diferentes configurações ao longo da calibração

Capítulo 4

Discussão

A análise quantitativa dos resultados, permite-nos concluir que o método de calibração aplicado neste trabalho pode ser considerado um método válido para realizar um melhor ajuste do modelo SWAN às condições ambientais que se pretendem analisar. Este facto, no entanto, não pode ser considerado válido para todos os resultados, nem para todas as configurações. Ao analisarmos os resultados para o período de pico, é notória a débil melhoria atingida após a calibração. Neste caso, será necessário analisar não só os resultados, mas também o significado do próprio parâmetro. O período de pico apresenta à partida algumas limitações, visto que estes valores são obtidos através de uma análise descontínua do espectro de frequências. Ao realizar esta análise, quer a bóia, quer o modelo, efectua uma compartimentação das frequências em intervalos de igual extensão, sendo apresentado como resultante o valor médio do intervalo onde é registado o valor de energia mais elevado. Este facto gera por si só uma descompensação entre os resultados do modelo e da bóia, uma vez que os intervalos considerados não são os mesmos. No entanto convém referir que, apesar da calibração não ter conseguido melhorar significativamente os resultados do período de pico, o modelo SWAN implementado para estes testes segue a tendência apresentada na literatura, sendo os valores de RMSE bastante próximos dos valores apresentados por outros autores (Booij *et al.* (1999), Dykes *et al.* (2009), Garcia *et al.* (2005), Holthuijsen (2007), Pires-Silva *et al.* (2002), Ris *et al.* (1999), Rogers (2005), Rogers *et al.* (2007), Rusu *et al.* (2008a), Rusu *et al.* (2008b)).

A pequena variação dos resultados poderá indicar que o período de pico poderá ser pouco sensível aos parâmetros ajustados no decorrer da calibração. No entanto torna-se evidente, que em trabalhos posteriores, a opção de analisar os parâmetros

integrais do espectro não é a opção mais viável, sendo por isso de equacionar a análise do espectro na sua totalidade (uma opção que neste momento não é possível de realizar com a bóia de Leixões).

Para a formulação de Komen, os resultados obtidos são bastante positivos. Além da melhoria evidente nos valores de RMSE absoluto, será necessário analisar também as melhorias no *Scatter Index* (SI). As melhorias apresentadas pela calibração do modelo são bastante significativas e traduzem de forma correcta as condições de agitação na área analisada. Ao analisarmos as Figuras 3.4, 3.5 e 3.6, torna-se perceptível que os termos dissipativos estão, com a configuração pré-estabelecida do modelo, a ser subvalorizados. Após a calibração, e com o subsequente aumento do termo de dissipação por *whitecapping*, os valores ajustam-se de forma mais correcta às observações.

Este estudo apresenta, para esta formulação, um novo conjunto de parâmetros, que se ajustam de forma mais coerente aos resultados obtidos neste período. No entanto os valores obtidos não deverão ser interpretados como um valor fixo, o qual não deverá sofrer subseqüentes ajustes. Se analisarmos os valores obtidos para os diferentes parâmetros calibrados, para a formulação de Komen (ver Tabela 4.1), é facilmente perceptível a variação que o mesmo parâmetro sofre em diferentes configurações. Este facto prende-se com a necessidade do modelo MICUT ajustar os termos fonte (os termos de geração) e sumidouro (termos de atrito de fundo e de *whitecapping*) de forma a encontrar o melhor ajuste entre os resultados do modelo e as observações da bóia. Como esta busca é feita de uma forma *semi-estocástica* podemos estar perante uma situação em que o ajuste deixe de possuir significado físico. Poderá ocorrer com a calibração, um aumento exagerado dos termos fonte e uma posterior diminuição dos termos de dissipação, que não seria necessária, caso o aumento dos termos fonte fosse mais reduzido. No entanto importa realçar os resultados obtidos com este processo, uma vez que a configuração inicial das formulações utilizadas no SWAN, é realizada em condições bastante distintas das condições apresentadas neste trabalho.

A variação do termo de calibração correspondente aos *quadruplets* (λ) não apresenta grandes alterações nos resultados. Foi realizado um teste de controlo, em que se fixou este termo com o valor pré-definido e não foram notadas alterações significativas nos resultados. A utilização de uma técnica mais robusta, tal como o método de Webb-Resio-Tracy (WRT), poderá resolver de forma mais correcta este fenómeno, sendo que neste momento o balanço entre os ganhos em termos de exactidão e o aumento

do esforço computacional não é ainda positivo (Westhuysen *et al.*, 2007).

As diferentes formulações utilizadas para descrever o atrito de fundo, não possuem, tal como era esperado, uma grande influência nos resultados. Às profundidades a que foram realizadas as medições (a bóia de Leixões encontra-se fundeada a aproximadamente a 80 metros de profundidade) a contribuição do atrito de fundo, para a dissipação da energia das ondas de superfície é bastante diminuta. Porém, este processo, irá assumir grande importância em zonas de profundidade mais reduzida. Assim sendo, será necessário avaliar de forma mais aprofundada, as implicações de realizar alterações aos valores pré-definidos destes parâmetros, através da comparação dos resultados do modelo, com medições realizadas a profundidades mais reduzidas.

Tabela 4.1: Valores de pré-definidos (iniciais) para cada parâmetro e os novos parâmetros calculados após a calibração (*best*) para a formulação de Komen. Os parâmetros estão divididos por configuração, variando entre si a formulação para o atrito de fundo (**Atrito**).

Configuração		$C_{ds-komen}$	a_{cm}	Atrito	λ
Madsen	calibrado	0.0002	0.0014	0.0963	0.1729
	iniciais	0.0000236	0.0015	0.05	0.25
Collins	calibrado	0.0001	0.0020	0.03	0.1
	iniciais	0.0000236	0.0015	0.015	0.25
JONSWAP	calibrado	0.0001	0.0010	0.067	0.1395
	iniciais	0.0000236	0.0015	0.097	0.25

Na Tabela 4.2 são apresentados os parâmetros obtidos após a calibração e também os valores pré-definidos. Analisando as duas tabelas em conjunto (4.1 e 4.2) torna-se perceptível, que as alterações principais nos resultados do modelo, se devem à variação do termo associado ao *whitecapping*. Nas calibrações da formulação de Westhuysen, o termo correspondente ao *whitecapping* está fixo, uma vez que o modelo não nos permite alterar o seu valor.

Nestas calibrações apenas são alterados os termos correspondentes ao crescimento por acção do vento (a_{cm}), atrito de fundo e *quadruplets* (λ). Mesmo após uma variação destes parâmetros para os seus limites máximos (ver Tabela 2.2), os resultados mantêm-se praticamente inalterados, enquanto que com a calibração da formulação de Komen, a mesma variação aliada ao ajuste do termo de *whitecapping*, produz

uma melhoria significativa nos resultados, comprovando que este termo deverá ser o principal responsável pela melhoria obtida com o ajuste.

Tabela 4.2: Valores de pré-definidos (iniciais) para cada parâmetro e os novos parâmetros calculados após a calibração (*best*) para a formulação de Westhuysen. Os parâmetros estão divididos por configuração, variando entre si a formulação para o atrito de fundo (**Atrito**).

Configuração		a_{cm}	Atrito	λ
<i>Madsen</i>	<i>calibrado</i>	0.000043	0.20	0.11
	<i>iniciais</i>	0.0015	0.05	0.25
<i>Collins</i>	<i>calibrado</i>	0.000064	0.03	0.10
	<i>iniciais</i>	0.0015	0.015	0.25
<i>JONSWAP</i>	<i>calibrado</i>	0.0020	0.067	0.10
	<i>iniciais</i>	0.0015	0.10	0.25

Numa primeira análise podemos referir que, para a formulação de Komen obtiveram-se melhores resultados após a calibração do modelo, enquanto que para a formulação de Westhuysen esta melhoria não foi atingida. No entanto esta formulação (Westhuysen) já apresenta por defeito resultados com um grau de exactidão bastante elevado. Esta formulação é bastante mais recente do que as restantes e como tal ainda não possui uma série de trabalhos de validação que permitam aferir a sua real capacidade. O trabalho mais recente apresentado pelos autores (Westhuysen *et al.*, 2007), descreve os processos de calibração da formulação, sendo estes testes realizados em zonas de *fetch* limitado, zonas de profundidade reduzida e um teste numa zona de plataforma continental, em que a presença de *swell* assume um papel importante nas condições de agitação incidentes. Este caso, que apresenta grandes similaridades (em termos de condições ambientais) com o trabalho aqui apresentado, demonstranda a viabilidade desta formulação. Neste caso o modelo foi testado em situações com e sem a influência de *swell* proveniente do exterior do sistema. Em situações sem a influência de *swell*, ambas as formulações (Komen e Westhuysen) respondem de forma satisfatória, havendo uma boa correlação entre os resultados obtidos e as observações. Ao ser adicionado a entrada de ondulação do exterior do sistema, ocorre uma diminuição da concordância dos resultados obtidos com a formulação de Komen, enquanto que a formulação de Westhuysen continua a representar as observações de forma correcta. Com a formulação de Komen e na presença de *swell*, a frequência de pico (em comparação com a análise da situação sem a presença de *swell*) e a cauda do espectro na zona das altas frequências, duplicam,

em termos energéticos. Além deste incremento, a frequência de pico da componente de ondulação sofre um transporte para frequências mais baixas. Este *shift* em frequência, acaba por compensar o incremento excessivo de energia imposto pela componente de geração local, impedindo assim que se obtenham valores completamente despropositados. No entanto este ganho, acaba por ser pouco claro, uma vez que a transferência espectral efectuada eleva a importância do *swell* no sistema, o que diminui a declividade espectral. Sabendo que na formulação de Komen, a taxa de *whitecapping* é calculada com base nesta premissa (ver Equação (1.36)), ocorrerá um crescimento exagerado das ondas, ou de uma forma mais correcta, existe uma subestimação da dissipação de energia por *whitecapping*. Este facto também é demonstrado pelo trabalho de Arduin e Jenkins (2006), neste caso com base em diferentes modelos, mas que utilizam a mesma formulação de base (Komen). Pelo contrário, com a formulação de Westhuysen, o modelo não altera significativamente a sua exactidão na presença de *swell*, uma vez que a formulação baseia-se no número de onda (k) para calcular a taxa de dissipação de energia (ver Equação (1.41)) e não em valores espectrais médios, como a declividade espectral. Este facto permite que a formulação de Westhuysen mantenha o mesmo desempenho na presença de *swell*, o que no caso específico da Costa Oeste Portuguesa, poderá representar a grande maioria das situações observadas.

Após a calibração efectuada com este trabalho, e tendo sido alcançados de forma bastante aproximada, os mesmos resultados com ambas as formulações, seria bastante interessante realizar este mesmo tipo de teste, analisando a resposta do sistema à presença ou ausência de *swell*. Infelizmente, os dados disponíveis das bóias ondógrafo, não nos permitem obter o espectro na sua totalidade, sendo apenas possível a análise de parâmetros integrais do espectro. Este será, sem dúvida, um factor a equacionar em trabalhos futuros.

Os recentes resultados obtidos com esta formulação têm dominado a evolução do modelo. Neste momento, a abordagem da equipa responsável pelo seu desenvolvimento, em relação às formulações de geração de ondas por acção do vento, centra-se no desenvolvimento e aperfeiçoamento da formulação de Westhuysen. Com a aposta nesta metodologia, as outras formulações (Komen e Janssen) não têm sido melhoradas, sendo que após a versão 40.41, a formulação de Janssen apresenta resultados muito inconstantes e muito pouco realistas, com valores de RMSE (para a área de estudo apresentada neste trabalho) da ordem dos 6 metros, utilizando os parâmetros pré-definidos. Com este tipo de resultados, o modelo MICUT é incapaz de realizar

uma calibração correcta, uma vez que mesmo utilizando a totalidade do intervalo de variação dos parâmetros previamente definidos, não é capaz de convergir para uma solução minimamente aceitável. Assim sendo foi necessário realizar uma calibração prévia, alterando os parâmetros pré-definidos e o seu respectivo intervalo de variação. Desta forma, e apesar do valor indicado para o parâmetro $C_{ds-janssen}$ no manual ser de 4.5, foi determinado (através de um ajuste manual prévio) que o valor *real* inicial deveria ser aproximadamente 17. Este facto levanta uma série de dúvidas no decorrer deste processo, uma vez que este novo valor inicial, é uma aproximação encontrada após uma série de testes e não corresponde ao valor calculado analiticamente no processo de construção da formulação. Desta forma, a fiabilidade desta formulação e da continuidade da sua utilização de forma operacional ficam seriamente comprometidas. Torna-se relevante referir que esta formulação em versões anteriores, nomeadamente até à versão 40.41, apresentava valores de RMSE menores do que a formulação de Komen, sendo por isso a mais utilizada em termos operacionais (Rusu *et al.*, 2008b). Assim sendo, torna-se necessário não considerar os resultados obtidos com a formulação de Janssen como válidos para este estudo, sendo necessário por parte da equipa de desenvolvimento, a realização uma análise ao código do modelo, a fim de verificar a existência de algum erro nesta formulação, entretanto criado com as alterações impostas pelas novas versões.

Capítulo 5

Conclusões

Com este trabalho comprova-se a exequibilidade da calibração de um modelo espectral de previsão da agitação, através da metodologia de calibração inversa. Apesar dos resultados apresentados para a formulação de Janssen que, tal como foi descrito, apresenta erros graves, a formulação de Komen foi visivelmente melhorada através da calibração. A redução do *scatter index* e do RMSE para valores similares aos apresentados por outros autores, e aos obtidos através da formulação de Westhuyesen, comprovam este facto. Comprovou-se também, através dos resultados obtidos, a dependência directa desta formulação (Komen) na entrada de *swell* no sistema, e as suas implicações na avaliação correcta do crescimento das ondas provocado pelo vento e respectiva dissipação de energia por *whitecapping*. Após a calibração, foi encontrado um novo conjunto de parâmetros, que melhor representam as condições de agitação esperadas.

Um dos factores mais importantes na escolha deste tipo de metodologias de calibração, é a necessidade de se efectuar um trabalho de pós-processamento menos complexo. Devido à aplicação deste processo, o tempo envolvido na análise dos resultados é reduzido drasticamente, tornando-se assim possível despende mais tempo no esforço computacional, ou realizar um maior número de testes. Este trabalho vem comprovar, a possibilidade de utilização desta técnica na calibração do modelo SWAN, abrindo assim caminho a calibrações posteriores, de outro tipo de formulações, ou analisando diferentes fenómenos não abrangidos por este estudo.

A análise dos resultados obtidos para o período de pico apontam em duas direcções distintas. Numa primeira análise, os parâmetros analisados não influenciam de forma significativa a variação do período de pico. No entanto, será necessário analisar de

forma mais aprofundada os *shifts* em frequências, impostos pela entrada de *swell* no sistema (no caso da formulação de Komen) e também pelas interações entre grupos de ondas (neste caso os *quadruplets*). Uma análise do espectro, em detrimento da análise de parâmetros integrais do espectro, como foi realizado, poderá elucidar-nos um pouco melhor sobre estas transferências de energia entre frequências. A utilização de uma formulação mais exacta, na descrição dos *quadruplets* (como o método de Webb-Resio-Tracy), poderá apresentar algumas melhorias neste campo, embora neste momento, esta técnica ainda não seja computacionalmente eficiente, sendo por isso proibitiva em termos operacionais.

A formulação de Westhuysen apresenta resultados bastante satisfatórios, sendo neste momento a melhor opção, para a previsão da agitação através do modelo SWAN. Com esta formulação elimina-se a dependência da declividade espectral, na avaliação da dissipação de energia por rebentação parcial (*whitecapping*), o que permite a análise de sistemas de agitação complexos, com a presença de ondas de geração local e *swell*. Este trabalho vem desta forma, validar esta formulação para as condições de agitação presentes na Costa Oeste da Península Ibérica, apresentando assim uma melhoria significativa nos resultados, em detrimento da utilização da formulação de Komen, ou Janssen.

Bibliografia

- Alves, J. e Banner, M., 2003. Performance of a saturation-based dissipation-rate source term in modelling the fetch-limited evolution of wind waves, *Journal of Physical Oceanography*, 33, 1274-1298.
- Ardhuin, F. e Jenkins, A., 2006. On the interaction of surface waves and upper ocean turbulence, *Journal of Physical Oceanography*, 36, 551-557.
- Battjes, J. e Janssen, J., 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves, *Proc. of the 16th International Conference of Coastal Engineering*, 569-587.
- Booij, N., R. C. Ris and L. H. Holthuijsen, 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104, 7649-7666.
- Broyden, C., 1965. A class of methods for solving nonlinear simultaneous equations. *Math. Comput.* 19, 577-593.
- Bouws, E. e Komen, G., 1983. On the balance between growth and dissipation in an extreme, depth-limited wind-sea in the southern North Sea. *Journal of Geophysical Research*, 87, 5718-5722.
- Cavaleri, L. e Malanotte-Rizzoli, P., 1981. Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. *Journal of Geophysical Research*, 86, C11, 10961-10973.
- Collins, J., 1972. Prediction of shallow water spectra, *Journal of Geophysical Research*, 77, 15, 2693-2707.
- Costa, M. e Esteves, R., 2008. Clima de Agitação Marítima na Costa Oeste de Portugal Continental. *XI Jornadas Técnicas de Engenharia Naval - O Sector Marítimo Português*. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Dias, J., 1987. *Dinâmica Sedimentar e Evolução Recente da Plataforma Continental Portuguesa Setentrional*. Universidade de Lisboa, Lisboa.

- Dias, J., Jouanneau, J., Araújo, M., Drago, T., Garcia, C., Gonzalez, R., Oliveira, A., Rodrigues, A., Vitorino, J., Weber, O., 2002. Present day sedimentary processes on the northern Iberian shelf. *Progress in Oceanography*, 52(2-4), 249-259.
- Dingemans, M., 1997. *Water wave propagation over uneven bottoms*. Advanced Series on Ocean Engineering, Volume 13, 1ª edição, World Scientific, Singapore.
- Doherty, J., 2004. *PEST: Model-Independent Parameter Estimation*. User Manual. 5ª Edição. Watermark Numerical Computing.
- Dykes, J., Hsu, Y, Rogers, W., 2002. The Development of an Operational SWAN Model for NGLI. *Oceans '02 MTS/IEEE*, 2, 859-866.
- Dykes, J., Wang, D., Book, J., 2009. An evaluation of a high-resolution operational wave forecasting system in the Adriatic Sea. *Journal of Marine Systems*, doi:10.1016/j.jmarsys.2009.01.027.
- Eldeberky, Y., 1996. *Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone*, Tese de Doutorado, Delft University of Technology, Delft.
- Garcia, P., Balseiro, C., Penabad, E., Gómez, B. and Pérez-muñuzuri, V., 2005. One year validation of wave forecasting at Galician coast. *Journal of Atmospheric and Ocean Science*, 10(4), 407-419.
- Hasselmann, K., Barnett, T., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D., Enke, K., Ewing, J., Gienapp, H., Hasselmann, D., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D., Richter, K., Sell, W., H., Walden, 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), *Deutsche Hydrographic Zeitschrift*. Suplemento 12, A8.
- Hasselmann, K., 1974. On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping, *Boundary-Layer Meteorology*. 6, 1-2, 107-127.
- Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J., Barnett, T., 1985. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear transfer for application in wave models, *Journal of Physical Oceanography*., 15, 11, 1378-1391
- Holthuijsen, L., 2007. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. 1ª edição, Cambridge University Press, Cambridge.

- Janssen, P., 1991. Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting, *Journal of Physical Oceanography*. 21, 1631-1642.
- Komen, G., Hasselmann, S., Hasselmann, K., 1984. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum, *Journal of Physical Oceanography*. 14, 1271-1285.
- Komen, G., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselman, K., Hasselman, S., Janssen, P., 1994. *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. 1ª edição, Cambridge University Press, Cambridge.
- Levenberg, K., 1944. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Q. Appl. Math.*, 2, 164-168.
- Madsen, O., Poon, Y., Graber, H., 1988. Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory, *Proc. 21th Int. Conf. Coastal Engineering*, ASCE, 492-504.
- Marquardt, D., 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics*, v11, 2, 431-441.
- Ou, S., Liau, J., Hsu, T., Tzang, S., 2002. Simulating typhoon waves by SWAN wave model in coastal waters of Taiwan. *Ocean Engineering*, 29,947-971.
- Pires-Silva, A., Makarynskyy, O., Monbaliu, J., Ventura-Soares, C., Coelho, E., 2002. Wam/Swan Simulations in an Open Coast: Comparisons with ADCP Measurements. *Littoral 2002, The Changing Coast - EUROCOAST*, 169-173.
- Pierson, W. e Moskowitz, L., 1964. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii, *Journal of Geophysical Research*, 69, 24, 5181-5190.
- Ris, R., Holthuijsen, L. and Booij, N., 1999. A third-generation wave model for coastal regions, 2. Verification. *Journal of Geophysical Research*, 104, 7667- 7681.
- Rogers, W., Kaihatu, J., Petit, H., Booij, N., Holthuijsen, L., 2002. Diffusion reduction in an arbitrary scale third generation wind wave model. *Ocean Engineering*, 29, 1357-1390.
- Rogers, W., 2005. *Validation of three sub-regional-scale, wave forecasting systems created by the naval research laboratory for the national weather service coastal storms program*. CSI Validation Report, Naval Research Laboratory, 66p.

- Rogers , W., Kaihatu, J., Hsu , L., Jensen , R., Dykes , J., Holland, K., 2007. Forecasting and hindcasting waves with the SWAN model in the Southern California Bight. *Coastal Engineering*, 54, 1-15.
- Rusu, E., Pilar, P. and Soares, C., 2008a. Evaluation of the wave conditions in Madeira Archipelago with spectral models. *Coastal Engineering*, 35, 1357- 1371
- Rusu,L., Pilar, P., Guedes Soares, C., 2008b. Hindcast of the wave conditions along the west Iberian coast. *Coastal Engineering*, 55, 906-919.
- Sansana Silva, F., Pinto, J., Almeida, S., 2009. Operational Wave Forecast System for the Portuguese Coast. *Journal of Coastal Research*, SI 56, 1055-1059.
- Skahill, B., Baggett, J., Frankenstein, S., Downer, C., 2009. More efficient PEST compatible model independent model calibration. *Environmental Modelling and Software*, 24, 517 - 529.
- The SWAN Team, 2008a. *SWAN Scientific and Technical Documentation*. SWAN Cycle III version 40.72A. Delft University of Technology, Delft.
- The SWAN Team, 2008b. *SWAN User Manual*. SWAN Cycle III version 40.72A. Delft University of Technology, Delft.
- The WISE Group, 2007. Wave modelling - The state of the art. *Progress in Oceanography*, 75, 603-674.
- Thurman, H., A. Trujillo, 1999. *Essentials of Oceanography*. 6^a edição, Prentice Hall, New Jersey.
- Tolman, H., 1992. Effects of numerics on the physics in a third-generation wind-wave model. *Journal of Geophysical Research*, 22, 10, 1095-1111.
- Tolman, H., 2002a. Alleviating the Garden Sprinkler Effect in wind wave models. *Ocean Modelling*, 4, 269-289.
- Tolman, H., 2002b. *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22*. NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note 222, 133p.
- Tucker, M., 1991. *Waves in Ocean Engineering - measurement, analysis, interpretation*. Ellis Horwood Series in Marine Science, 1^a edição, Ellis Horwood Limited, West Sussex.

- van Vledder, G., 2006. The WRT method for the computation of non-linear four-wave interactions in discrete spectral wave models. *Coastal Engineering*, 53, 223-242.
- WAMDI group, 1988: The WAM model – a third generation ocean wave prediction model, *Journal of Geophysical Research*, 18, 1775–1810.
- Van der Westhuysen, A., Zijlema, M., Battjes, J., 2006. Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water. *Coastal Engineering*, 54, 151-171.
- Winterwerp, J., de Graaff, R., Groeneweg, J., Luijendijk, A., 2007. Modelling of wave damping at Guyana mud coast. *Coastal Engineering*, 54, 249-261.
- Wu, J., 1982. Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane, *Journal of Geophysical Research*, 87, C12, 9704-9706.
- Yan, L., 1987. An improved wind input source term for third generation ocean wave modelling, *Scientific report* WR-No 87-8, De Bilt, The Netherlands.