

MODELOS OPERACIONAIS DE PREVISÃO DA AGITAÇÃO PARA SUPORTE À NAVEGAÇÃO E À GESTÃO DE RISCOS

João Ribeiro, Adélio Silva, José Chambel Leitão

HIDROMOD, Modelação em Engenharia, Lda.

Resumo

A exploração de sistemas operacionais para previsão da agitação permite actualmente suportar a custos reduzidos sistemas de apoio à navegação e à gestão de riscos associados à acção das ondas sobre estruturas ou instalações costeiras. Os modelos, se implementados a escalas adequadas, podem ser utilizados por exemplo para optimização da operação de terminais, para a manutenção de canais de acesso aos portos ou para a implementação de sistemas de alerta em casos em que a segurança ou funcionamento de instalações ou estruturas costeiras possa ser posta em causa para determinadas condições de agitação.

Nesta perspectiva a Hidromod implementou um sistema de previsão de agitação para a costa portuguesa suportado pelos modelos Wave Watch III (WWIII) e SWAN que apresenta a característica de incluir subdomínios de grande resolução, com malhas da ordem dos 50 metros, para diferentes áreas. Estes submodelos de grande resolução suportam actualmente um sistema de alerta de situações de bloqueio com algas do sistema de arrefecimento da central térmica de Sines e permitem fornecer informação detalhada sobre as características da agitação ao longo dos canais de acesso aos portos de Lisboa e Setúbal com o objectivo de otimizar a profundidade requerida dos canais de navegação.

No caso do porto de Lisboa, o sistema de previsão está a ser utilizado no âmbito de um projecto promovido pela APL para a optimização do resguardo necessário sob a quilha dos navios para garantir uma navegação segura nos canais de acesso. O sistema que tem vindo a ser implementado, designado de *Dynamic Under-Keel Clearance* (DUKC) deverá permitir, com base, entre outros, no conhecimento detalhado da agitação ao longo do canal, aumentar o conhecimento sobre a dinâmica dos navios e conseqüentemente reduzir as margens de segurança requeridas actualmente para a profundidade a guardar sobre a quilha.

No caso do porto de Setúbal o sistema de previsão está actualmente em fase de testes tendo por objectivo estabelecer as bases de um sistema com objectivos similares.

Em ambos os casos, o sistema inclui a manutenção de um processo contínuo de validação que passa pela comparação dos resultados com as observações numa bóia ondógrafo da APL fundeada em profundidades da ordem dos 30 metros e com um sistema de medição da agitação instalado pela APSS na bóia de navegação da Baliza. As comparações são feitas nos parâmetros integrais da ondulação (altura significativa, período e direcção) mas também na energia espectral da onda. O sistema de modelação funciona em modo operacional, ou seja, todos os dias são geradas previsões para os três dias seguintes.

Este sistema também fornece previsões de agitação para toda a zona portuária de Sines, que têm vindo a ser validadas com os dados da bóia ondógrafo de Sines. Estas previsões são utilizadas no cálculo das situações em que pode haver desprendimento e transporte de algas que podem bloquear a tomada de água do circuito de refrigeração da Central Termoeléctrica de Sines.

Nesta comunicação para além da descrição dos sistema de previsão implementado e dos resultados da validação que tem vindo a ser efectuada, é igualmente apresentada uma análise sobre a sensibilidade do sistema à utilização dos modelos WWIII ou SWAN para a simulação

da agitação na costa portuguesa e sobre a relevância da utilização de previsões detalhadas da meteorologia para o aumento da qualidade das previsões efectuadas.

1 Introdução

A evolução que se tem registado nos modelos e nos meios computacionais veio permitir implementar sistemas de previsão da agitação em computadores de baixo custo. O facto de ser possível ter informação disponível sobre as características da agitação com 3 a 7 dias de antecedência contribuiu para a adopção de práticas de gestão das actividades ligadas ao mar mais optimizadas. É este o caso dos exemplos que são apresentados na presente comunicação: as aplicações para os Portos de Lisboa e Setúbal e para a Central Termoeléctrica de Sines.

No caso dos Portos o sistema de previsão pretende constituir uma ajuda à navegação e à optimização do esforço de dragagem dos canais de acesso, no caso da Central Termoeléctrica o sistema de previsão suporta um sistema de alerta para o transporte excessivo de algas para a tomada de água, processo que está intimamente ligado a condições específicas da agitação no local.

1.1 Implementação nos Portos de Lisboa e Setúbal

Em 1999, na sequência do alargamento e aprofundamento do Terminal de Contentores de Alcântara, a APL iniciou a procura de soluções que permitissem a entrada de navios de maior calado no canal da barra. Com este propósito foram efectuados diversos estudos que permitissem suportar tecnicamente uma opção de aprofundamento do canal. Neste âmbito foram implementados diferentes modelos para a zona da barra envolvendo a simulação de processos de agitação, propagação da maré e transporte de sedimentos e produzido um manual “das condições de prática das barras do Tejo”. Os estudos de modelação e este manual apontavam para a necessidade de conhecer em tempo real as condições de agitação marítima na barra. Em consequência a APL adquiriu um sistema de medição da agitação constituído por uma bóia ondógrafo fundeada nas proximidades da entrada do canal da barra e um ondógrafo de fundo (ADCP) colocado em local mais interior na proximidade do canal (junto ao Bugio).

Mais recentemente, a APL adquiriu o sistema DUKC (Dynamic Under Keel Clearance) para determinação do resguardo necessário sob a quilha dos navios para garantir uma navegação segura nos canais de acesso. Este resguardo destina-se a garantir as variações de imersão por efeito da agitação marítima. O funcionamento do sistema implica uma integração entre resultados dos modelos de agitação, os dados fornecidos em tempo real em pontos ao longo dos canais e os resultados da simulação dinâmica do comportamento dos navios.

Na sequência deste processo foi implementado um sistema para modelação da agitação que tem como objecto caracterizar as ondas em diferentes pontos ao longo do canal de navegação. A validação do sistema de modelação é efectuada com base nos dados da bóia ondógrafo e do ADCP. Um dos objectivos é utilizar os dados simultâneos da bóia e do ADCP para validar o modelo em águas pouco profundas mas, infelizmente até à data, umas vezes por problemas na bóia outras vezes por problemas no ADCP, ainda não foi possível obter um período com estes dados em simultâneo.

Independentemente deste contratempo foi implementado um sistema de previsão baseado nos modelos Wave Watch III para as simulações de grande escala e no modelo SWAN para as simulações de menor escala que tem vindo a ser validado com os dados da bóia ondógrafo. Esta validação tem incluído comparações tanto ao nível de parâmetros integrais (altura significativa, período, direcção) como ao nível da comparação da distribuição de energia no espectro.

No caso do porto de Setúbal a APSS tem vindo a instalar uma rede de monitorização de dados meteoceanográficos que inclui medidores de nível na Baliza 2, Tróia, Trem Naval e Setenave e meteorologia na Baliza 2, Tróia, Trem Naval e Setenave. O medidor de nível instalado na Baliza 2 tem características que lhe permitem medir também a agitação. Neste caso o sistema não é direccional, já que apenas mede a altura num ponto mas permite determinar os valores da altura significativa e do período (Figura 1).

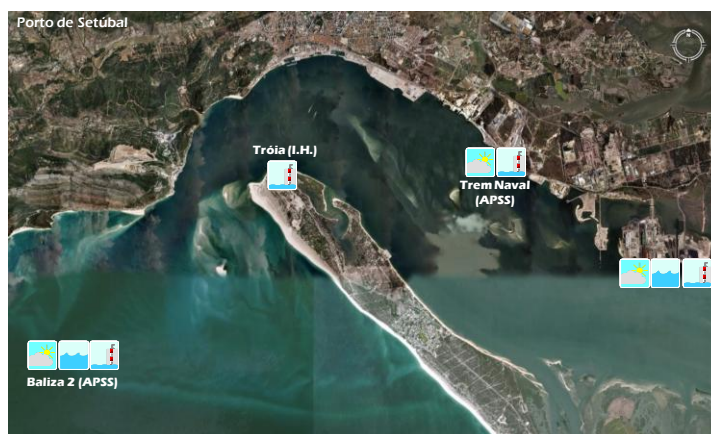


Figura 1 – Localização das estruturas da APSS.

À semelhança de Lisboa, têm vindo a ser mantido um modelo operacional para previsão da agitação, que tem vindo a ser validado com os dados disponíveis para a estação da Baliza 2.

Em ambos os casos o sistema de modelação da agitação considera a variação do nível da maré ao longo do dia. Actualmente o sistema de previsão da agitação pode utilizar os dados de nível do modelo operacional para a costa portuguesa que disponibiliza em modo operacional as previsões para a hidrodinâmica na costa portuguesa incluindo os efeitos da circulação de grande escala, do vento e da maré.

A fim de permitir incluir também a interacção das ondas com as correntes, o sistema está neste momento a sofrer uma actualização introduzindo mais um subnível no sistema de modelação operacional da costa portuguesa que permita uma simulação detalhada da hidrodinâmica dos estuários do Tejo e Sado. Este aspecto assume especial importância no caso do canal da barra no porto de Setúbal.

1.2 Implementação em Sines na Central Termoeléctrica

A Central Termoeléctrica de Sines (CTS) da EDP situa-se a 150 km a Sul de Lisboa, no complexo industrial de Sines, junto à praia de S.Torpes e é constituído por quatro grupos de 314 MW cada, perfazendo uma potência de 1256 MW. A refrigeração da CTS é feita através de água do mar. Esta água é bombeada através de quatro grupos, localizados no interior de uma bacia de adução, protegida da agitação marítima por dois quebra-mares. O caudal bombado no conjunto pelos 4 grupos é de 40 m³/s.

A afluência de algas à bacia de adução da CTS, em situação de mar agitado e correntes desfavoráveis, provoca colmatação dos filtros e a consequente paragem dos grupos. Estes fenómenos ocorrem com mais frequência nos meses de Março/Abril/Maio e Setembro/Outubro/Novembro. A análise dos dados das arribadas de algas da espécie *Sphaerococcus coronopifolius* (Sc) mostrou que estas ocorrem sempre após o Verão quando a ondulação tem energia suficiente e direcção adequada para que a potência no local exceda

valores da ordem das dezenas de kW/m. A relação entre a potência da onda no local e as arribadas de algas da espécie *Asparagopsis armata* (Aa), que ocorrem essencialmente na Primavera, é mais fraca, sendo necessário ter em consideração efeitos directos do vento no transporte destas algas para a bacia de bombagem.

Foi desenvolvido um índice que permite prever arribadas de algas da espécie Sc, em função do regime de ondulação. Este índice tem por base os resultados das previsões do modelo WWIII aplicado ao domínio da costa portuguesa e que tem uma resolução de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ (Figura 2).

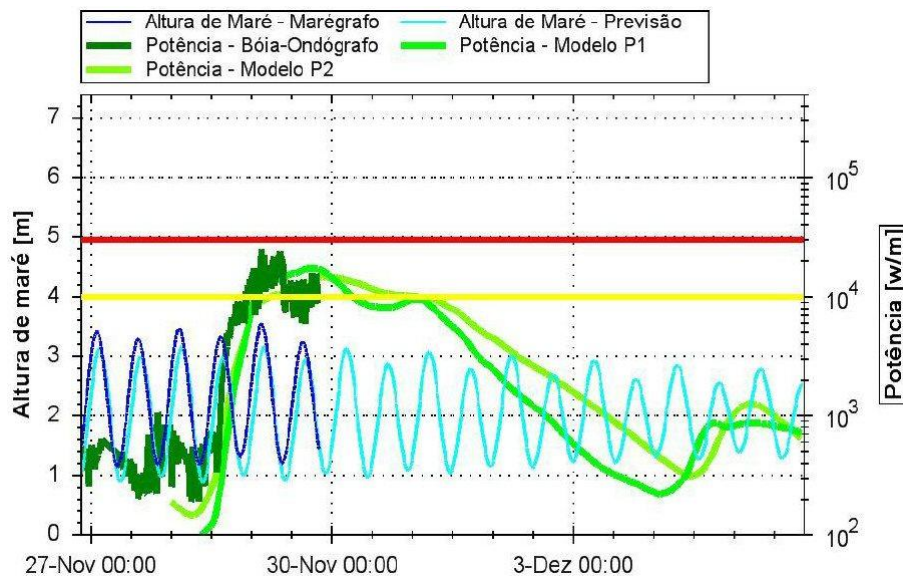


Figura 2 – Informação disponibilizada nos relatórios, a amarelo nível de alerta um e a vermelho nível de alerta dois.

Com base neste índice calculado a partir dos modelos de agitação, foi implementado um sistema de envio automático de relatórios por email com a previsão da ocorrência de situações de risco para as arribadas de algas.

2 Modelos operacionais

Desenvolvido pela NOAA/NCEP o WAVEWATCH III (Tolman 1997, 1999a) é um modelo de terceira geração para modelação de ondulação de larga escala.

Resulta de um melhoramento do modelo WAVEWATCH I, desenvolvido em Delft University of Technology (Tolman 1989, 1991) e do WAVEWATCH II, desenvolvido na NASA, Goddard Space Flight Center (e.g., Tolman 1992). WAVEWATCH III. Relativamente aos seus antecessores apresenta alterações ao nível das equações de governo, métodos numéricos e parametrizações físicas. WAVEWATCH III calcula a equação de equilíbrio da densidade espectral em função do número de ondas e direção.

O modelo considera ainda que as propriedades do meio (profundidade e correntes), bem como o campo de ondas variam em escalas de tempo e espaço muito maior do que as escalas de variação de uma única onda. Estes dois pressupostos implicam que o modelo pode ser utilizado em escalas espaciais que vão desde um quilómetro até dez quilómetros.

Um dos constrangimentos do modelo é o facto de que a parametrização do modelo não considera condições onde as ondas estão limitadas pela profundidade, isto é, zonas de rebentação e devido a isso não ser aconselhável utilizar nessas áreas.

As equações de governo utilizadas no modelo incluem a refração e alongamento do campo de ondas devido a variações espaciais e temporais da profundidade média e também o efeito de correntes.

As parametrizações físicas para a geração e decaimento das ondas incluem acção do vento, termos de interacção não linear, dissipação através de whitecapping e atrito no fundo. É considerado que a propagação é linear e que os termos não lineares relevantes estão incluídos nos parâmetros físicos de geração e decaimento. O modelo inclui ainda a possibilidade de assimilação de dados.

O WAVEWATCH III utiliza uma grelha espacial em termos de longitude e latitude e o espectro de energia, abrange todas as direcções, para isso é discretizado usando um incremento direccional constante e uma grelha variável do número de onda.

Em termos de resultados, é possível obter um conjunto variado de parâmetros tais como a altura significativa, direcção e período. Pode ser ainda solicitado a energia espectral da onda em localizações individuais e desse modo extrair condições de fronteira para a opção de nesting com o SWAN.

O SWAN é um modelo computacional de geração e propagação de ondas, concebido para zonas costeiras. Sendo um modelo de terceira geração tem como finalidade obter estimativas realistas da ondulação em zonas costeiras, lagos e estuários a partir de alguns parâmetros como o vento, a batimetria, o atrito e correntes e considera os seguintes processos que actuam na propagação de ondas:

- Propagação.
- Refracção por efeito do fundo e correntes.
- Difraccção de ondas.
- *Shoaling* por efeito do fundo e correntes.
- Bloqueio e reflexão devido a correntes contrarias.
- Transmissão através, bloqueio ou reflexão devido a obstáculos.
- Para geração e dissipação estão presentes os seguintes processos:
- Geração pelo vento.
- Dissipação por *whitecapping*
- Dissipação por rebentação devido a efeitos de batimetria.
- Dissipação por atrito no fundo.
- Dissipação por interacção onda-onda em águas profundas e pouco profundas.

O modelo é baseado na equação de equilíbrio espectral (Mei, 1983; Komenet al., 1994), tem incluído os efeitos de propagação espacial, refração, wave shoaling, geração, dissipação e interacções não lineares onda-onda.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \bar{x} \cdot [(\bar{c}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial c_\omega N}{\partial \omega} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\omega}$$

$$N(\bar{x}, t; \omega, \theta) = \frac{E(\omega, \theta)}{\omega}$$

representando $\frac{\partial N}{\partial t}$ é variação da acção de densidade energia, N é a acção densidade de energia e $E(\omega, \theta)$ corresponda a densidade de energia espectral.

O segundo termo corresponde à propagação da energia num espaço a duas dimensões no plano \vec{x} , em que \vec{c}_g corresponde à velocidade de grupo no plano (x, y) e \vec{U} representa a corrente vertical ambiente que é assumida como uniforme.

A deslocação ou variação da frequência angular devido a efeito do fundo e correntes é dada por $\frac{\partial c_\omega N}{\partial \omega}$. O quarto termo representa a refracção sofrida pela onda devido a efeitos do fundo e de corrente, em \vec{c}_ω e \vec{c}_θ são as velocidades de propagação no espaço espectral (ω, θ) , ω é a frequência relativa e θ é a direcção de propagação. Estes quatro termos constituem a parte cinemática da equação.

No lado direito da equação encontram-se os termos de produção e destruição, os quais representam todos os processos físicos que geram, dissipam e redistribuem a energia da onda. São considerados seis processos:

$S_{in} \Rightarrow$ Corresponde a acção do vento na superfície do oceano, transferência de energia do vento para as ondas através de mecanismo de ressonância (Phillips, 1957) e “feed-back” (Miles, 1957).

$S_{ds,w} \Rightarrow$ Dissipação de energia por whicapping (“carneirada”), (1988; Komen et al., 1984; Janssen, 1991).

$S_{ds,b} \Rightarrow$ Dissipação da energia da onda devido ao atrito no fundo (JONSWAP, 1973; Collins, 1972; Madsen et al., 1988).

$S_{ds,br} \Rightarrow$ Dissipação da energia da onda por rebentação devido a diminuição de profundidade (Battjes and Jansen, 1978).

$S_{nl4} \Rightarrow$ Interações não lineares onda-onda, neste caso interações de quatro ondas (Quadruplets), (Hasselmann et al., 1985).

$S_{nl3} \Rightarrow$ Interações não lineares onda-onda, neste caso interações de três ondas (Triads), (Eldeberky, 1996).

O modelo pode ser forçado com condições de fronteira teóricas, com condições de fronteira gerada por simulações anteriores do SWAN ou ainda condições de fronteira fornecidas por modelos de agitação marítima de larga escala.

A opção de nesting consiste em efectuar uma primeira corrida, com um domínio maior e com uma malha mais grosseira, a partir dessa corrida inicial retirar informação, gerar condições de fronteira para uma segunda corrida do modelo, mas desta vez com um domínio mais pequeno e uma malha mais fina.

Uma das particularidades desta opção de nesting é a possibilidade de interligação com outros modelos, neste caso modelos de larga escala como o WAM e WAVEWATCH III, que tal como SWAN são modelos de terceira geração. Estes modelos necessitam de menores recursos

computacionais combinados com modelos tipo SWAN permitem otimizar significativamente o sistema de previsão.

3 Implementação do sistema

O sistema de modelação é corrido em duas fases, sendo cada fase composta por três níveis. Na primeira fase é corrido o modelo de escala global WaveWatch 3 onde são calculados três domínios (Tabela 1, Figura 4), o forçamento é feito usando dados de vento do GFS (Global Forecasting System, NOAA) com uma resolução de 0.5° (Figura 3). O mesmo tipo de forçamento é mantido para todos os níveis, sendo que na simulação dos níveis inferiores é feita uma interpolação dos dados do GFS para a nova malha. A previsão operacional nesta primeira fase é de 7 dias.

Do modelo com maior resolução são então extraídas as condições de fronteira para forçamento do modelo SWAN que corre numa segunda fase. O modelo SWAN apresenta igualmente diferentes subdomínios de alta resolução sendo, presentemente, calculados três: Tejo, Sado e Sines (Figura 5 e Tabela 2). Estes domínios de alta resolução apresentam malhas de cálculo compatíveis com os objectivos a que se destinam (e.g navegação, alerta) permitindo gerar previsões adequadas à navegação ao longo de um canal (resoluções da ordem dos 50 metros). O forçamento do vento nas simulações com o modelo SWAN recorre aos resultados de previsão efectuados com o modelo MM5 com uma resolução de 9 quilómetros (Figura 6). Presentemente estas previsões estão a ser efectuadas para os próximos 3 dias.

Domínio	Resolução espacial
Atlântico Norte	0.5°x0.5°
Península Ibérica	0.25°x0.25°
Costa Portuguesa	0.05°x0.05°

Tabela 1 – Resolução espacial dos domínios aplicados.

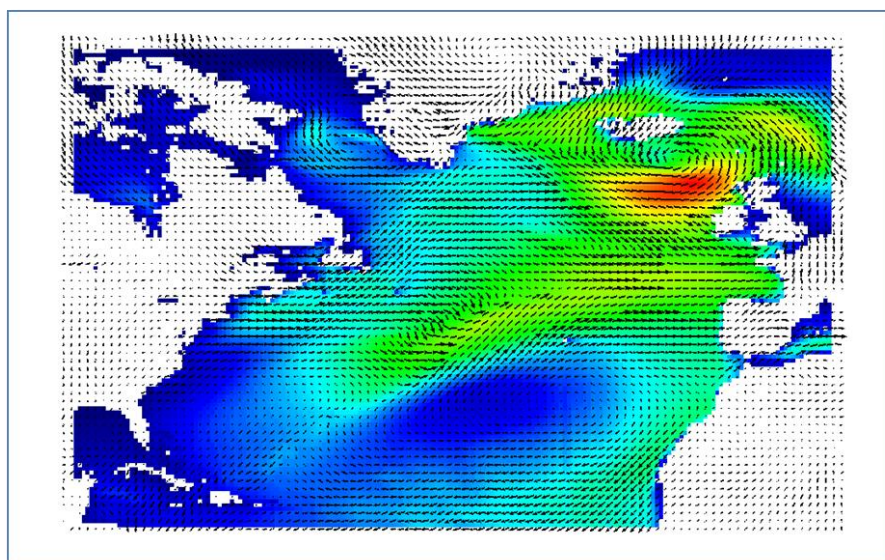


Figura 3 – Campo de ventos do GFS.

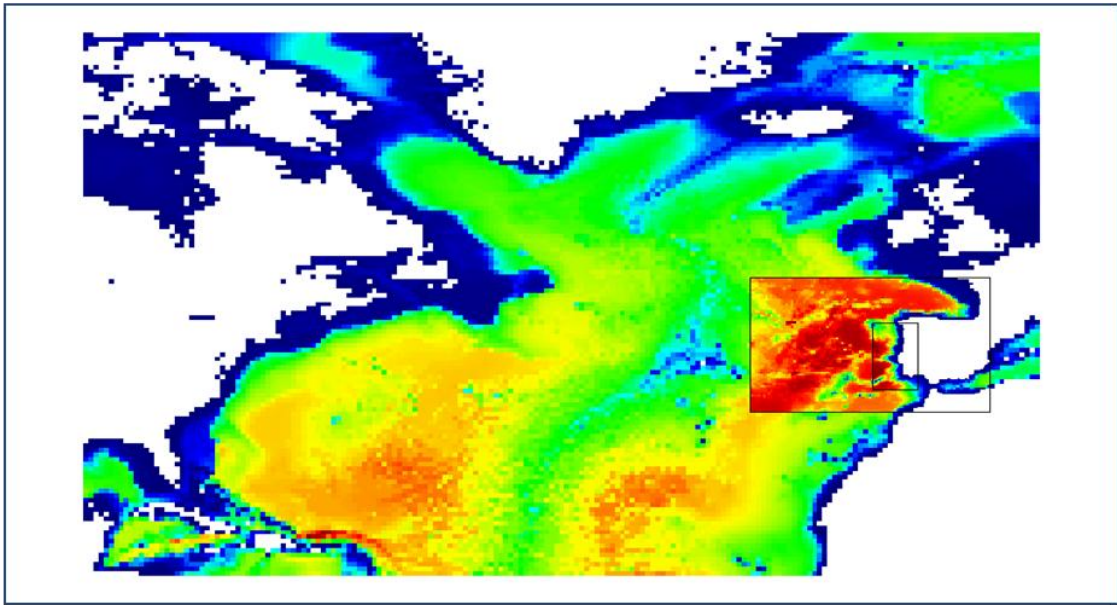


Figura 4 – Domínios considerados no Wavewach 3 e respectivas batimetrias.

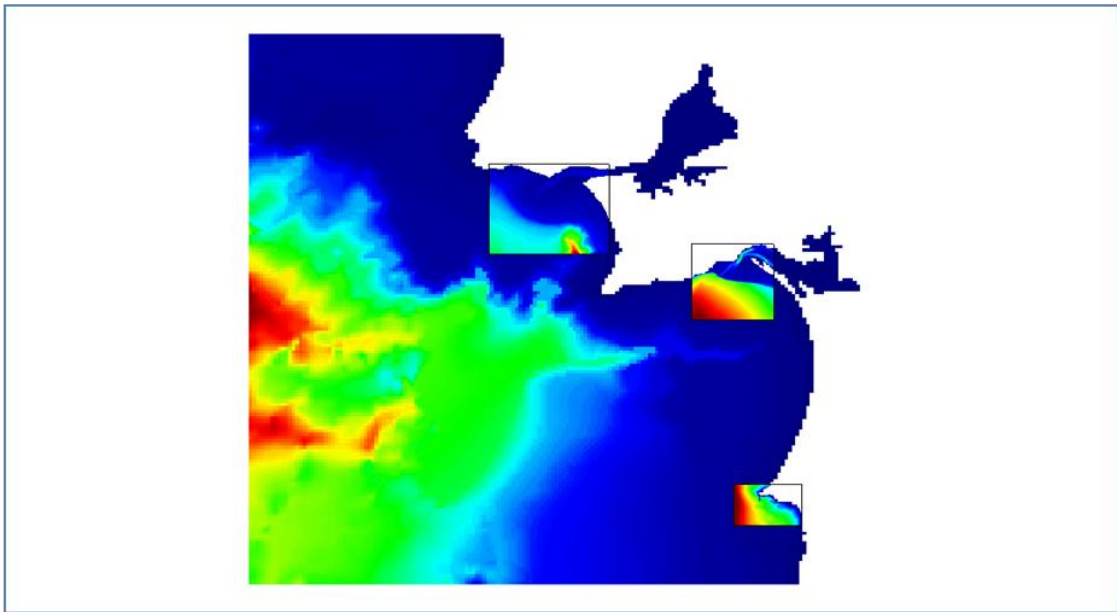


Figura 5 – Domínio exterior, os três sub-domínios considerados no SWAN e respectivas batimetrias.

Domínio	Resolução espacial
Exterior	0.01°x0.01°
Tejo	0.0005°x0.0005°
Sado	0.0005°x0.0005°
Sines	0.0005°x0.0005°

Tabela 2 – Resolução espacial dos domínios aplicados.

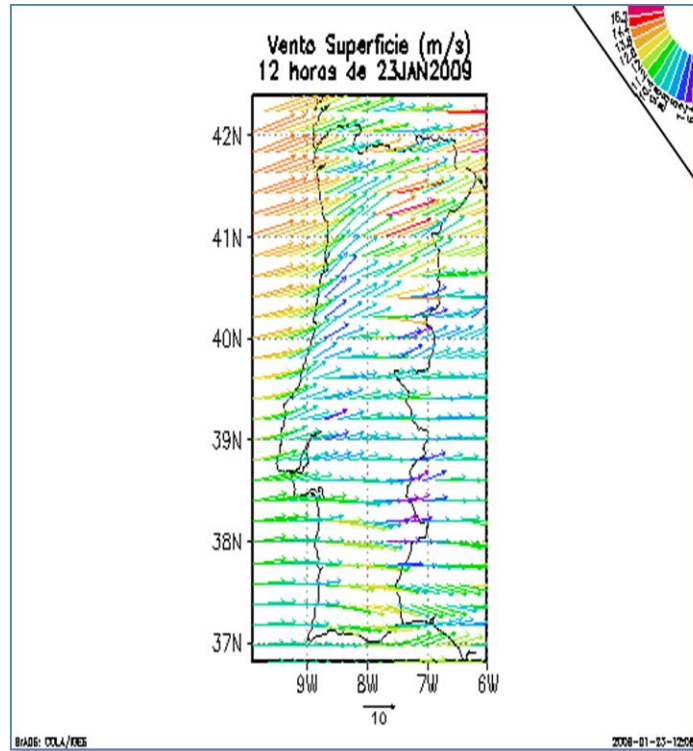


Figura 6 – Domínio do campo de ventos do MM5.

4 Resultados

Os resultados dos modelos são disponibilizados através de mapas de cores com a região em foco (Figura 7 e Figura 8) e também com gráficos dos principais parâmetros de ondulação (Figura 9).

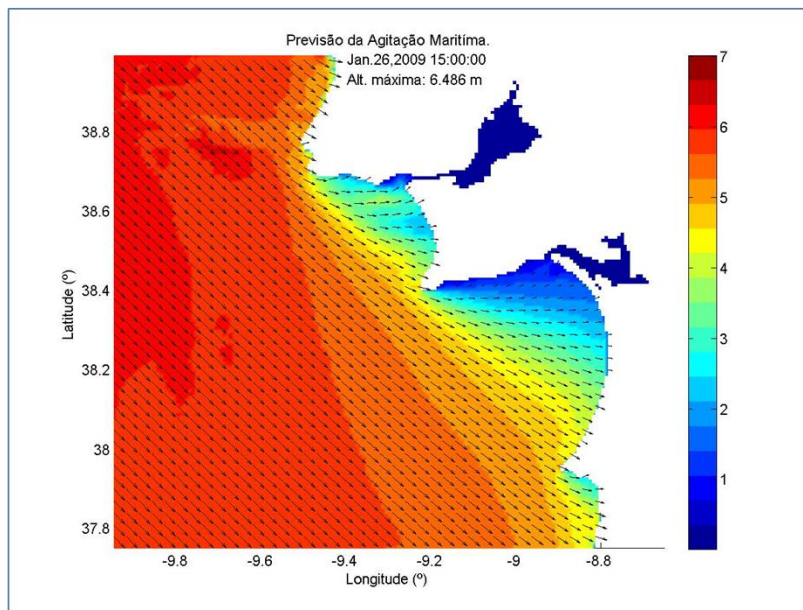


Figura 7 – Domínio exterior do Swan.

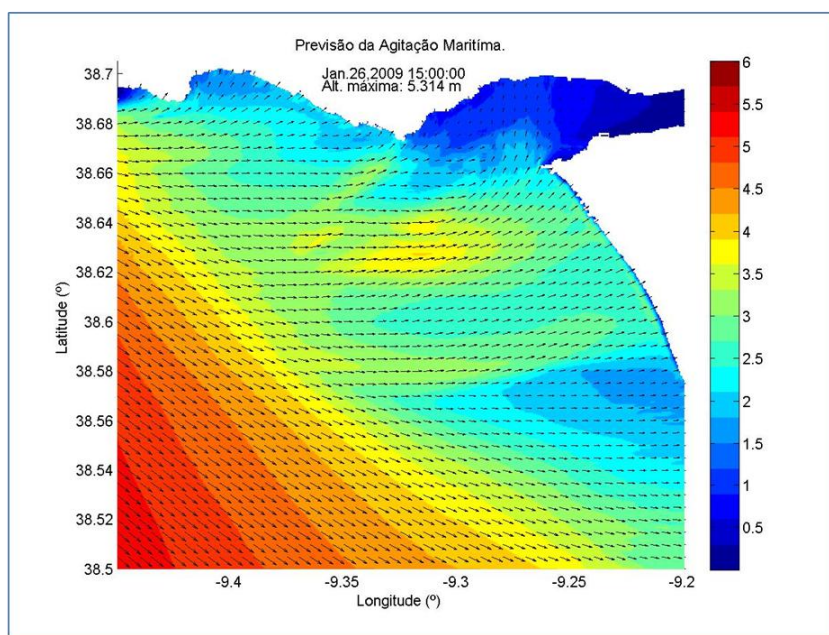


Figura 8 – Resultados para o domínio da embocadura do Tejo.

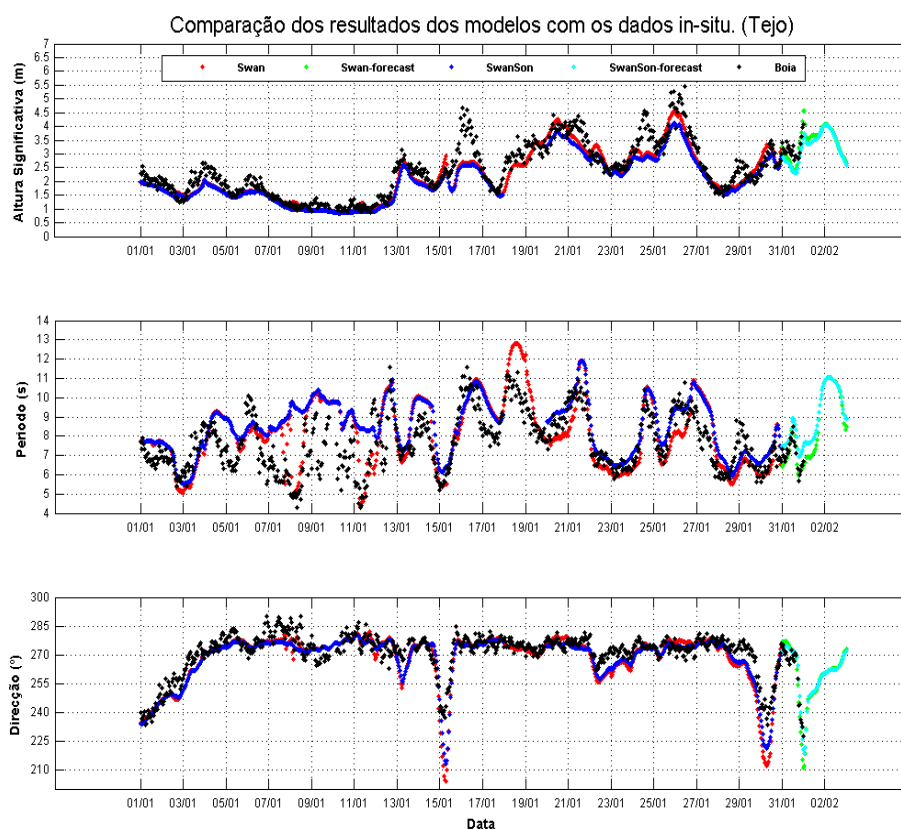


Figura 9 – Comparação dos resultados obtidos pelos vários modelos com as medições da Bóia.

Os resultados anteriores correspondem a simulações efectuadas com a consideração do forçamento do vento apenas no domínio exterior. O efeito de maré é considerado em todos os domínios simulados pelo Swan.

Os resultados obtidos foram validados com observações das bóias da APL, de Sines e do medidor de nível da APSS. A validação tem vindo a ser efectuada quer por comparação com os parâmetros integrais, como altura significativa, período e direcção acompanham os registos das bóias (cf. Figura 9), mas também através de análise da energia da onda que estão disponíveis para os dados da bóia da APL (Figura 10).

Os dados da bóia da APL, por serem os mais detalhados que se dispõem, foram também utilizados para efectuar vários testes de sensibilidade a diferentes parâmetros. Um dos testes realizados consistiu em verificar quais as diferenças entre utilizar a formulação de Komen ou de para o crescimento da onda, tendo-se verificado que a adopção da formulação de Janssen conduz a uma ligeira melhoria na previsão da altura significativa. Também o incremento do parâmetro AGROW de 0.0015 para 0.0030 conduziu a uma melhoria dos resultados fazendo com que a altura significativa se aproximasse mais dos valores pico.

A alteração das frequências mínima e máxima utilizadas por defeito no modelo SWAN para os mesmos valores da bóia também contribui para introduzir uma melhoria significativa ao nível da concordância com o espectro de energia.

Numa primeira fase em que ainda não se dispunham de dados de meteorologia de maior resolução não estava a ser considerado o forçamento do vento nos domínios de maior resolução do modelo SWAN. A introdução deste forçamento contribui igualmente para uma melhoria significativa nas previsões associadas à geração de local. Os resultados apresentados na Figura 10 permitem verificar que a curva a negro (sem vento) apresenta bastante menos energia que o modelo de menor resolução em que o vento é considerado (curva a vermelho). Com a introdução do vento as duas curvas passam praticamente a coincidir, sendo que a curva correspondente ao domínio de maior resolução apresenta agora um valor ligeiramente superior (Figura 11)

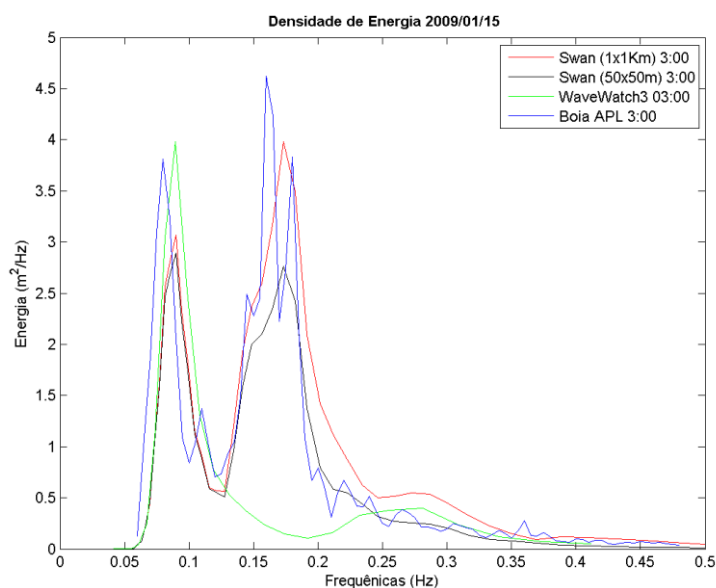


Figura 10 – Comparação do espectro de energia de onda gerado em cada modelo com o espectro de energia registado na bóia.

Na imagem acima o modelo de 50 metros de resolução não tem o forçamento do vento a ser aplicado. É possível verificar que o Wavewatch 3 (curva a verde) consegue reproduzir a energia típica da ondulação de longo período, mas que na geração local não é tão eficiente. Na transição para o Swan verifica-se uma perda de energia nas baixas frequências (curvas a negro e vermelho) mas nas frequências mais associadas à geração local aproxima-se dos valores registados na bóia. Como se pode verificar pela análise da Figura 11 a introdução do vento no modelo de maior resolução (curva a negro) conduz a um aumento da energia no segundo pico para valores próximos dos observados.

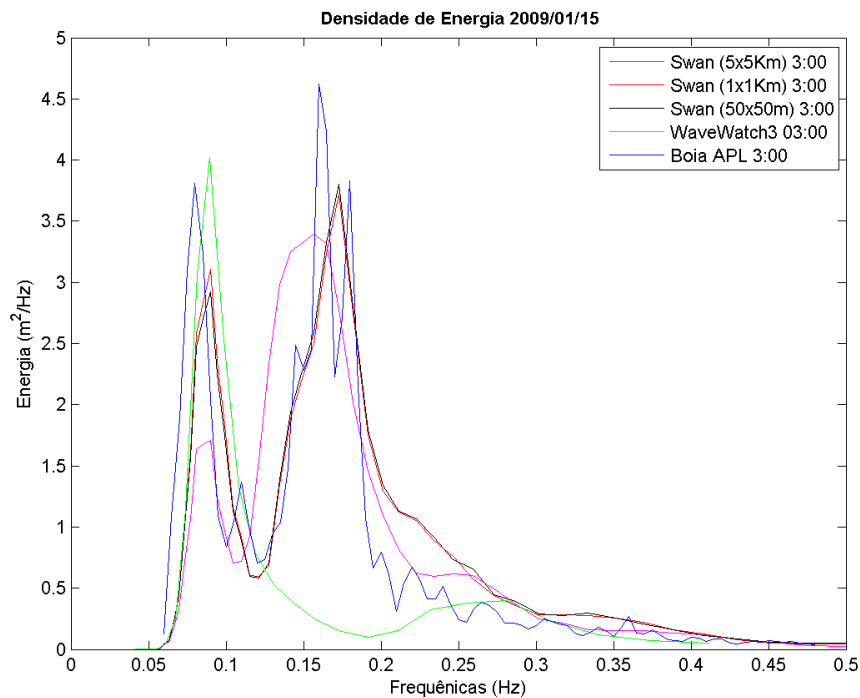


Figura 11 – Comparação do espectro de energia de onda gerado em cada modelo com o espectro de energia registado na bóia, introdução de vento no modelo de maior resolução.

4.1 Resultados estatísticos

A fim de ter uma visão mais global da concordância dos resultados do modelo com os dados da bóia foram calculados alguns parâmetros estatísticos associados à altura significativa, ao período médio e à direcção média. Para estes parâmetros foi efectuado o cálculo da média dos dados observados (X médio) e dos dados simulados (Y médio), e calculado o coeficiente de correlação (R), o enviesamento (Bias), o erro quadrático médio (RMSE) e o índice de dispersão (SI).

$$X_{medio} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}; Y_{medio} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$

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

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

$$SI = \frac{RMSE}{X_{medio}}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{medio})(Y_i - Y_{medio})}{\left(\sum_{i=1}^n (X_i - X_{medio})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{medio})^2 \right)^{1/2}}$$

Na Figura 12 são apresentados os resultados desta análise para o modelo do Tejo e na Figura 13 são apresentados os resultados para Sines.

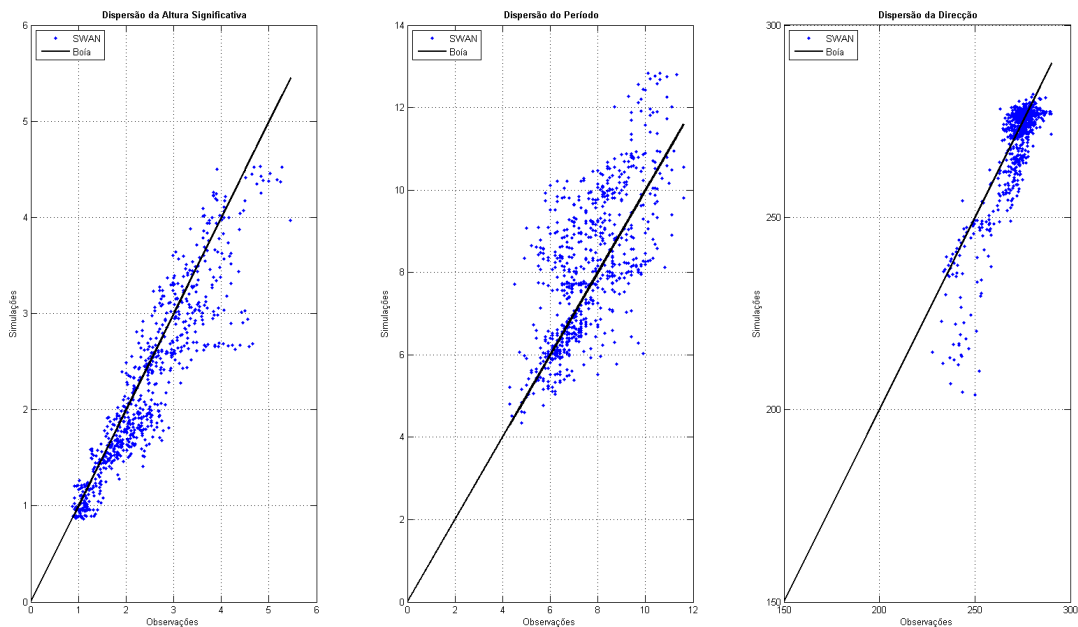


Figura 12 – Resultados da dispersão para o Tejo.

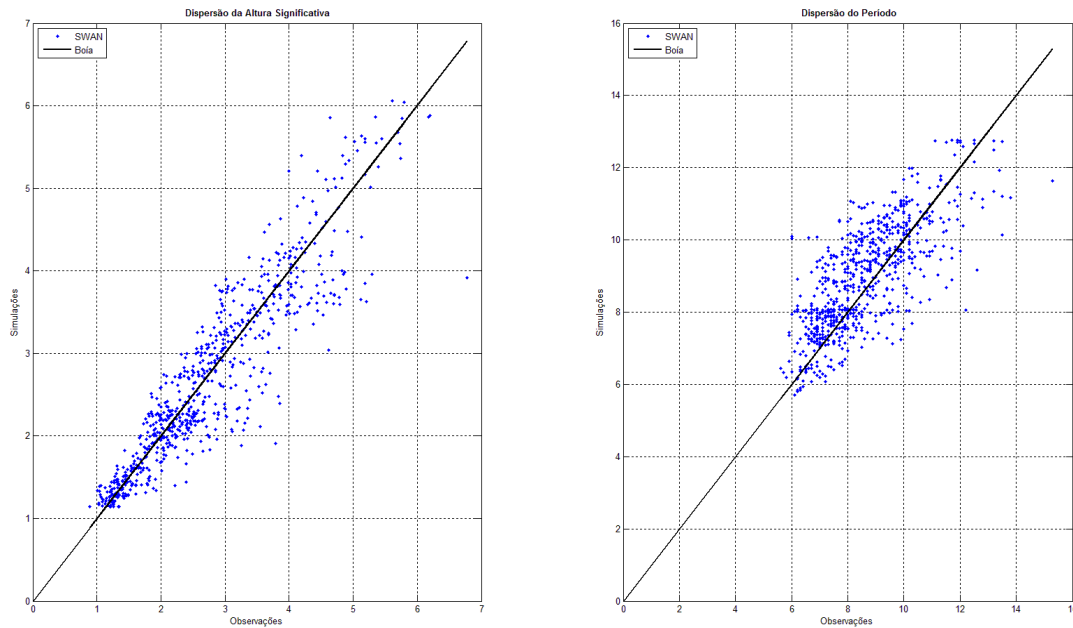


Figura 13 – Resultados da dispersão para Sines.

Nas tabelas seguintes são também apresentados os resultados para os domínios de menor resolução (Tabela 3) e de maior resolução do Tejo (Tabela 4) e para o modelo de maior resolução para a zona de Sines (Tabela 5).

Observando os valores obtidos para a altura significativa é possível constatar que para a zona do Tejo a correlação (R) atinge um valor bastante alto e que o modelo tende a subestimar este parâmetro, Bias positivo, em qualquer um dos domínios. O mesmo se verifica para direcção da ondulação, onde novamente se verifica uma correlação elevada e uma tendência do modelo a subestimar este parâmetro. Para o período médio da ondulação verifica-se que o modelo tende a supra estimar este parâmetro, uma vez que tem um Bias negativo, já a correlação apresenta valores inferiores ao restantes parâmetros, no entanto não deixam de ser valores bons uma vez rondam os 0.6 para cima, isto no caso do Tejo.

Para Sines verifica-se a mesma situação que na zona do Tejo para a altura significativa, mas essencialmente verifica-se uma melhoria significativa para o parâmetro do período, que neste zona já atinge uma correlação superior a 0.70, mantendo no entanto a tendência para o supra estimar.

Tejo (D. Exterior)	X médio	Y médio	Bias	RMSE	SI	R	Nº de amostras
Hs (m)	2.426	2.226	0.200	0.427	0.176	0.92	721
T (s)	7.638	8.077	-0.439	1.386	0.181	0.681	721
Dir (º)	270.972	267.931	3.011	7.653	0.028	0.877	721

Tabela 3 – Resultados estatísticos para o modelo exterior.

Tejo	X médio	Y médio	Bias	RMSE	SI	R	Nº de amostras
Hs (m)	2.381	2.054	0.326	0.481	0.202	0.938	675
T (s)	7.516	8.427	-0.911	1.561	0.207	0.584	675
Dir (º)	270.754	267.872	2.881	6.709	0.024	0.882	675

Tabela 4 – Resultados estatísticos para o modelo de maior resolução.

Sines	X médio	Y médio	Bias	RMSE	SI	R	Nº de amostras
Hs (m)	2.741	2.692	0.048	0.449	0.163	0.917	702
T (s)	8.576	8.926	-0.350	1.156	0.134	0.746	702

Tabela 5 – Resultados estatísticos para o modelo de maior resolução em Sines

5 Conclusões

Nesta comunicação é apresentado um sistema de previsão da agitação para suporte à navegação e a sistemas de alerta. Como se pode verificar pelos resultados obtidos o modelo tem vindo a mostrar uma fiabilidade significativa tanto no que respeita à previsão dos parâmetros integrais mais tradicionais (Hs, T, Dir) mas também no que respeita à previsão da distribuição da energia no espectro.

Da observação dos resultados dos parâmetros integrais é possível verificar que o modelo de forma geral acompanha as observações. A introdução do forçamento do vento também no domínio de maior resolução permitiu aumentar a concordância com os valores observados.

Na altura significativa os resultados do modelo acompanham os registos da bóia, com a excepção de alguns picos, onde o modelo subestima o valor da altura significa. Estas situações acontecem essencialmente em alturas de variação muito rápida verificando-se que se o crescimento se fizer de uma forma mais gradual o modelo concorda bastante bem com as medidas. A correlação obtida em qualquer um dos modelos para a altura significativa é superior a 0.9. No entanto a tendência do modelo é para subestimar este parâmetro uma vez que se obtém um Bias positivo.

Também é possível efectuar o mesmo tipo de análise para a direcção da ondulação. Para as observações registadas no estuário do Tejo, verifica-se uma elevada correlação dos valores simulados e os valores da bóia, novamente aqui o modelo subestima este parâmetro- No caso de Sines não são apresentadas comparações, uma vez que a informação recolhida sobre a direcção não permite efectuar uma avaliação correcta.

Relativamente ao período médio, o modelo consegue acompanhar os registos da bóia, no entanto a análise dos resultados obtidos mostra que existe uma tendência para sobrestimar os valores (Bias negativo).

No que respeita aos valores obtidos para o espectro de energia, verifica-se que no primeiro pico existe alguma subestimação da energia no modelo em relação aos valores medidos na bóia mas no segundo pico existe uma boa concordância.

O sistema de previsão implementado, apesar de continuar a sofrer um trabalho contínuo de validação e ajustamento dos parâmetros à medida que vai aumentando a base de dados disponível e o conhecimento das respostas dos modelos, garante assim nesta altura uma base confiável de previsão da agitação para os fins a que está a ser utilizada.

6 Agradecimentos

Agradece-se Administração do Porto de Lisboa e à Administração dos portos de Setúbal e Sesimbra a facultação do dados de observação que têm vindo a permitir a validação do sistema de previsão.

7 Referências

Kinsman, B - Wind Waves -Their Generation and Propagation on the Ocean Surface, Dover Phoenix Editions, 676p.

Pond, S; Pickard G - Introductory dynamical oceanography, 2nd edition, Butterworth Heinemann, 329p, 1983.

Stewart, R - Introduction to physical oceanography, Department of Oceanography Texas A & M University, 344p, 2003.

Dykes, J; Hsu, Y; Rogers, W – SWAN Evaluation in the Northern Gulf of Mexico, Oceanography Division, Naval Research Laboratory, 13p.

Mittendorf, K; Kohlmeier, M; Zielke, W – A Hind-cast data base for the design of offshore wind energy structures in the German bight, Institute of fluid Mechanics and Computer Applications in Civil Engineering, 13p

U.S. Army Corps of Engineers – Coastal Engineering manual, Part II, Chapter One: Water wave mechanics, Department of the Army, 115p, 2001.

The SWAN team – SWAN Implementation Manual, Delft University of Technology, 23p, 2007.

The SWAN team – SWAN User manual, Delft University of Technology, 111p, 2007.

The SWAN team – SWAN Technical documentation, Delft University of Technology, 93p, 2007.

Holthuijsen; L – Waves in Oceanic and Coastal Waters, Delft University of Technology, Cambridge University Press 387p, 2007.

Tolman, H – User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22, U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, 133p, 2002

<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/index2.shtml>

<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/Welcome.html>