

AVALIAÇÃO DO SISTEMA OPERACIONAL DE PREVISÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA IMPLEMENTADO PARA O PORTO DE LEIXÕES

Liliana Rusu e C. Guedes Soares

Centro de Engenharia e Tecnologia Naval (CENTEC), Instituto Superior Técnico,

Universidade Técnica de Lisboa, Portugal

lrusu@mar.ist.utl.pt; guedess@mar.ist.utl.pt

RESUMO

O objectivo do presente trabalho é de apresentar o sistema de previsão da agitação marítima que se encontra operacional no Centro de Engenharia e Tecnologia Naval (CENTEC) e de avaliar o desempenho desse sistema na área de alta resolução que cobre a entrada no porto de Leixões.

Junto à costa o sistema está baseado no modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore), forçado com condições de fronteira do modelo WAM (Wave Analyses Model) e com campos de vento simulados pelo modelo atmosférico MM5 (Mesoscale Meteorological Model). As previsões são actualizadas diariamente para 4 dias, com uma resolução temporal de 3 horas. A avaliação dos resultados do sistema de previsão é realizada através da comparação das previsões dos parâmetros de ondas com medições realizadas pela bóia ondógrafo posicionada na proximidade do porto de Leixões, dados que são disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico. Realiza-se uma avaliação do desempenho do sistema de previsão em cada uma das suas etapas e no resultado final.

1. INTRODUÇÃO

As actividades económicas desenvolvidas nas águas costeiras de Portugal Continental, e especialmente na proximidade dos importantes portos, têm tido uma importância crescente nos últimos anos. As características dos estados do mar são conhecidas em tempo real através das medições realizadas por bóias ondógrafos colocadas geralmente junto a portos, mas para um melhor planeamento das suas actividades, as autoridades portuárias precisam de ter disponível informação antecipada sobre os estados do mar que podem interferir na entrada ou saída dos navios. Esta informação pode ser fornecida pelos sistemas operacionais de previsão da agitação marítima, baseados em modelos numéricos executados em domínios de alta resolução, de modo a ser possível fornecer previsões fidedignas sobre o estado do mar na proximidade dos portos. Adicionalmente, estes sistemas permitem conhecer as condições de mar em qualquer ponto de uma dada área, fornecendo assim uma cobertura geográfica bem mais ampla, que apoia também as outras actividades desenvolvidas nas áreas costeiras.

Os centros internacionais ou nacionais fornecem em geral previsões meteorológicas e de agitação marítima numa escala global, que não tem em conta adequadamente as características específicas das áreas locais. Esta situação justifica o desenvolvimento e a implementação de sistemas operacionais de previsão da agitação marítima que estejam baseados em modelos numéricos regionais, executados em domínios de alta resolução.

Inserido neste contexto, o Centro de Engenharia e Tecnologia Naval (CENTEC) iniciou no âmbito do projecto MARPORT (que terminou em Outubro de 2008) a implementação de um sistema operacional que teve como objectivo fornecer previsões de agitação marítima para os portos de Sines e Leixões (Guedes Soares *et al.*, 2008, 2011; Bernardino *et al.*, 2009). O desenvolvimento do sistema foi continuado no âmbito do projecto NEARPORT (finalizado em

Março de 2011), de modo a incluir vários domínios de alta resolução, sendo dada ênfase às áreas costeiras junto aos vários portos do país (Leixões, Figueira da Foz, Peniche, Lisboa, Sines e Faro), onde foram também efectuadas validações 'in situ' por comparação com medições. Foram efectuados estudos de calibração de modo a conceber uma configuração do sistema, mais precisa, para a costa portuguesa. Esta configuração foi alcançada através da activação dos processos físicos mais relevantes e seleccionando as parametrizações adequadas dentro das opções disponíveis.

Neste trabalho é avaliado o desempenho do sistema de previsão implementado à entrada do porto de Leixões, a análise dos resultados sendo realizada por um período de oito meses, a partir de Outubro de 2010.

2. O SISTEMA DE PREVISÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA

As previsões da agitação marítima junto à costa Portuguesa são produzidas utilizando o modelo numérico SWAN (Booij *et al.*, 1999), versão 40.81. É um modelo de terceira geração baseado na equação para a conservação da acção de onda e permite a propagação da agitação marítima desde o largo até próximo da costa considerando uma grande variedade de processos físicos, tais como crescimento de onda por acção dos ventos, interacções não lineares onda-onda, refracção, difracção (modelada de modo simples), empolamento, rebentação por influência do fundo e por excesso de declividade (*whitecapping*), e dissipação de energia devido à fricção do fundo.

Apesar de, inicialmente, o modelo ter sido desenvolvido particularmente para as áreas costeiras, as suas capacidades foram aumentadas nas duas direcções: fora de costa e junto à costa. Actualmente, a área de aplicabilidade deste modelo aumentou consideravelmente das áreas locais de alta resolução para escalas quase oceânicas. O modelo pode ser utilizado quer nas coordenadas cartesianas quer nas coordenadas esféricas.

Para obter uma representação real dos efeitos da batimetria sobre as características das ondas que se propagam nas áreas costeiras, o modelo SWAN foi implementado em três níveis de grelhas encaixadas sendo as características apresentadas na Tabela 1, bem com as parametrizações da implementação do modelo.

Tabela 1 – Parametrização do modelo SWAN.

Grelha	Larga	Média	Fina
Resolução Δx (°)	0.05°	0.01°	0.005°
Resolução Δy (°)	0.1°	0.02°	0.005°
No. de pontos em x	101	101	125
No. de pontos em y	101	101	101
Batimetria	Resolução igual à grelha computacional		
Condições de fronteira	WAM	SWAN larga	SWAN média
Forçamento	Vento aos 10m produzidos pelo modelo MM5		
Modo computacional	Não estacionário		
Discretização temporal	20 min		
Esquemas numéricos	S&L	BSBT	BSBT
Fricção de fundo	Formulação JONSWAP		

As várias áreas de aplicação do modelo SWAN estão representadas na Figura 1, embora a implementação da grelha fina esteja ainda em testes. As grelhas batimétricas, para qualquer um dos domínios, foram adquiridas através do site GEBCO (General Bathymetric Chart of the Ocean). A grelha mais larga compreende uma área que cobre a Plataforma Continental Portuguesa e faz a interface entre o modelo WAM ciclo 4 (WAMDI Group, 1988) aplicado numa escala oceânica (Pilar *et al.*, 2008), e o modelo SWAN aplicado numa escala regional. Para

além das condições de agitação marítima fornecidas pelo modelo global WAM ao longo da grelha larga (espectros 2D), o modelo SWAN é forçado com campos de vento.

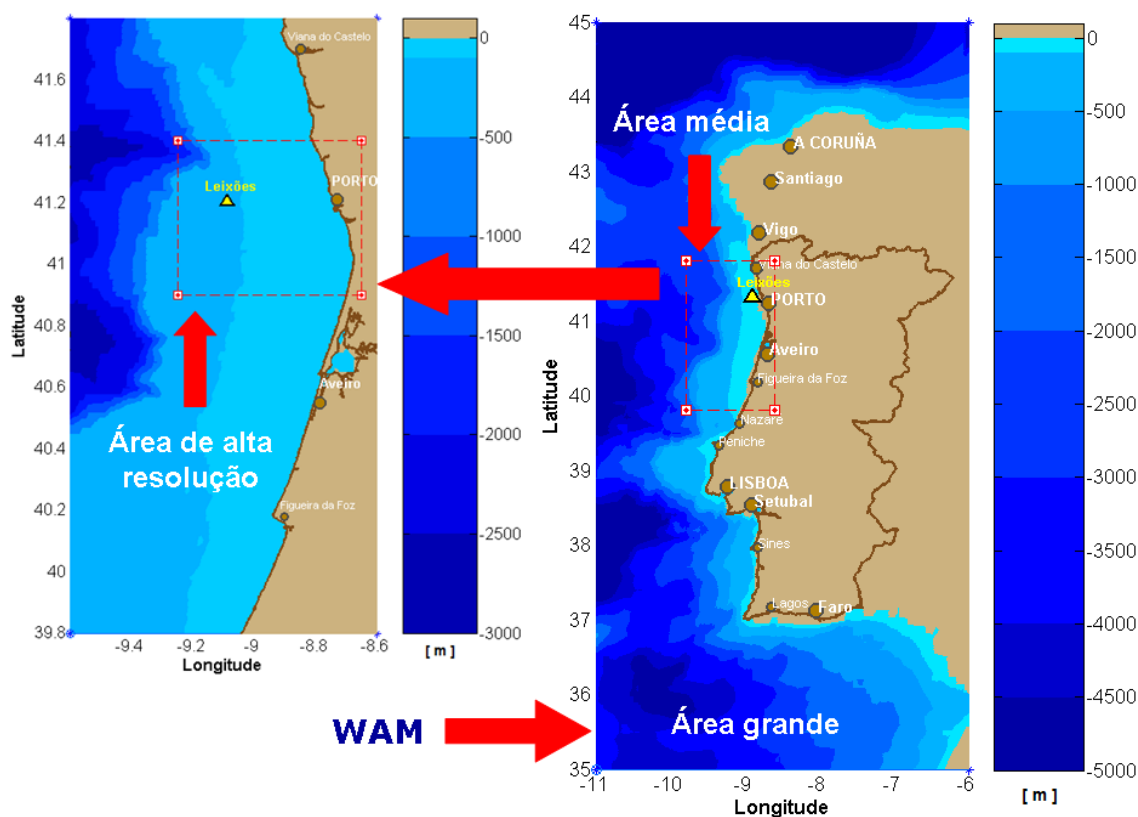


Figura 1 – As áreas de aplicação do modelo SWAN.

Para a previsão meteorológica à escala local é utilizado o modelo de mesoscala MM5 (Dudhia *et al.*, 2000; Grell *et al.*, 1994) que fornece campos de vento aos 10 metros com resolução temporal de 6 horas. O modelo está implementado em três níveis de grelhas encaixadas de resoluções cada vez maiores, a grelha mais larga possuindo uma resolução de 38 km. Para manter a interação de dois sentidos a relação de aninhamento foi sempre de 3:1 (Rusu *et al.*, 2008a).

2.1 Avaliação das parametrizações do modelo SWAN

No modelo SWAN podem ser utilizadas várias alternativas para a formulação dos processos de geração e propagação em águas profundas. Neste momento estão disponíveis no SWAN três formulações para considerar o processo de dissipação por rebentamento de ondas (*whitecapping*) associadas com formulações para a acção atmosférica.

Na área de Portugal Continental já foram realizados testes de desempenho por cada formulação (Rusu *et al.*, 2006; Rusu *et al.*, 2008b), mas as últimas actualizações introduzidas no modelo SWAN, juntamente com o facto que no actual sistema MARPORT os campos meteorológicos utilizados no forçamento dos modelos de ondas (WAM e SWAN) são diferentes do que nos trabalhos mencionados, determinaram a necessidade de uma reavaliação do sistema. As simulações foram efectuadas sucessivamente utilizando as três formulações disponíveis que foram denominadas como SWAN1 (Janssen, 1991), SWAN2 (Alves e Banner, 2003) e SWAN3 (Komen *et al.*, 1984). A avaliação dos resultados foi realizada em todos os três domínios.

Para avaliar os resultados das previsões de agitação marítima foram realizadas comparações das séries temporais dos parâmetros de onda (altura significativa e período médio) previstos

pelo modelo SWAN e observados pela bóia de Leixões (8.983°W, 41.316°N). Os dados observacionais de agitação marítima utilizados foram os disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico através do seu site. A localização da bóia de Leixões encontra-se representada na Figura 1. Foi considerado o intervalo desde 5 de Outubro de 2010 até 31 de Maio de 2011, um período em qual ocorreram várias situações de temporal com alturas significativas acima de 4.5 m. Uma vez que as séries temporais das previsões foram amostradas com uma frequência temporal de 3 horas, também as medições consideradas têm a mesma resolução temporal (com algumas falhas em situações em que não foi possível recolher os dados).

Os gráficos representados nas Figuras 2 e 3 traduzem as séries temporais dos parâmetros alturas significativas (H_s) e períodos médios (T_m), os valores observados e simulados em Leixões no domínio grande do modelo SWAN, por cada formulação utilizada. Através da comparação directa das séries temporais de altura significativa medida e simulada, representada na Figura 2, observa-se que em geral as previsões acompanham bem as observações, sem diferenças significativas entre as séries temporais produzidas pelo modelo SWAN utilizando as três formulações. Não se pode dizer o mesmo no caso dos períodos médios. Notam-se diferenças entre os valores medidos e simulados, como entre os valores obtidos pelo modelo SWAN implementado na área grande com diferentes formulações.

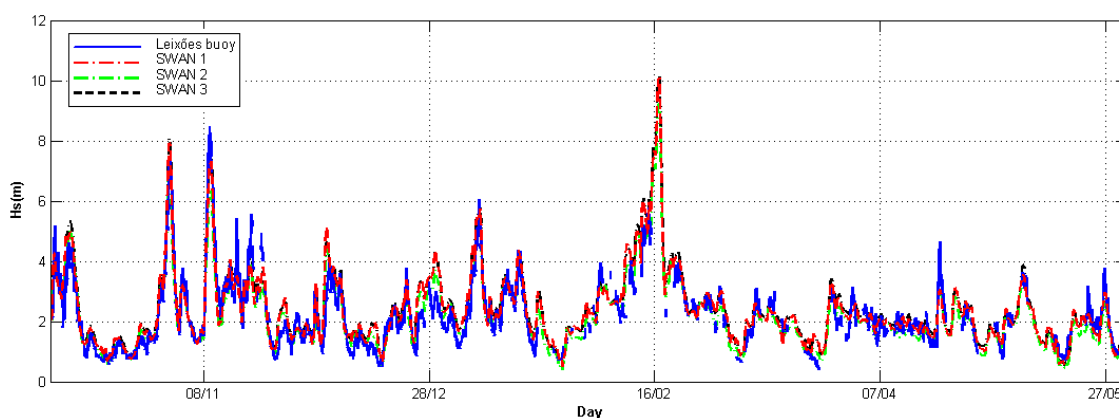


Figura 2 – Comparação das alturas significativas resultantes das simulações do modelo SWAN (área larga) com as medições da bóia de Leixões, período 05.10.2010 – 31.05.2011.

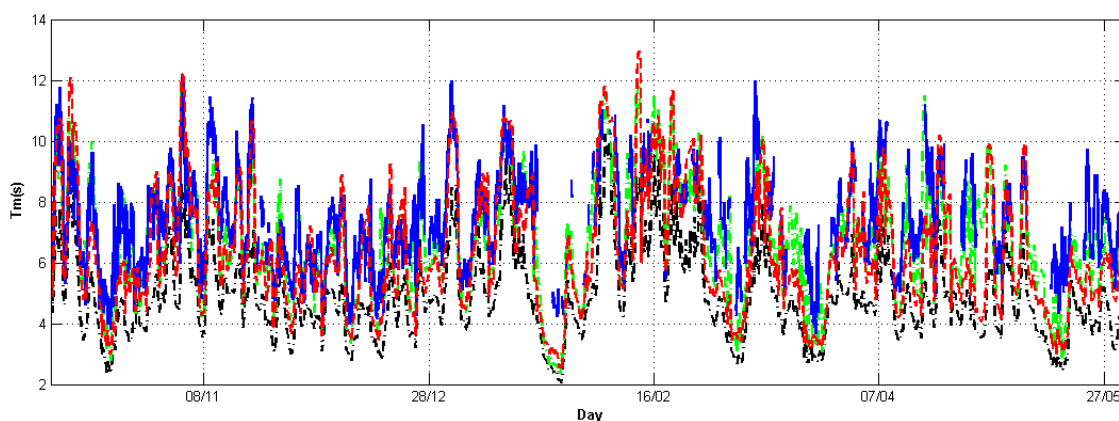


Figura 3 – Comparação dos períodos médios resultantes das simulações do modelo SWAN (área larga) com as medições da bóia de Leixões, período 05.10.2010 – 31.05.2011.

A análise qualitativa dos resultados foi realizada através do cálculo de alguns parâmetros estatísticos como o viés (*Bias*), o erro quadrático médio (*RMSE*), o índice da dispersão (*S*), o coeficiente da correlação (*R*) e o declive (*S*), calculados com as formulas standard para a altura significativa e para o período médio, sendo os resultados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados estatísticos (área larga).

N=1374	B_{med}	S_{med}	Bias	RMSE	SI	R	S	
H_s (m)	2.15	2.32	0.17	0.52	0.24	0.91	1.07	SWAN1
	2.15	2.13	-0.02	0.43	0.20	0.92	0.98	SWAN2
	2.15	2.40	0.25	0.51	0.24	0.93	1.09	SWAN3
T_m (s)	7.23	6.25	-0.98	1.54	0.21	0.79	0.88	SWAN1
	7.23	6.56	-0.67	1.16	0.16	0.84	0.92	SWAN2
	7.23	4.75	-2.48	2.64	0.37	0.82	0.66	SWAN3

Observa-se que o viés calculado para H_s tem valores positivos no caso de SWAN1 e SWAN3, o que indica que o modelo aplicado com estas parametrizações tem tendência de sobrestimar este parâmetro. O mesmo é indicado pelo valor de declive, com valores maiores de 1 nos casos acima mencionados. Os parâmetros estatísticos indicam que os melhores resultados foram obtidos com SWAN2. O período médio é sistematicamente subestimado pelo modelo, destaca-se com o pior desempenho SWAN3.

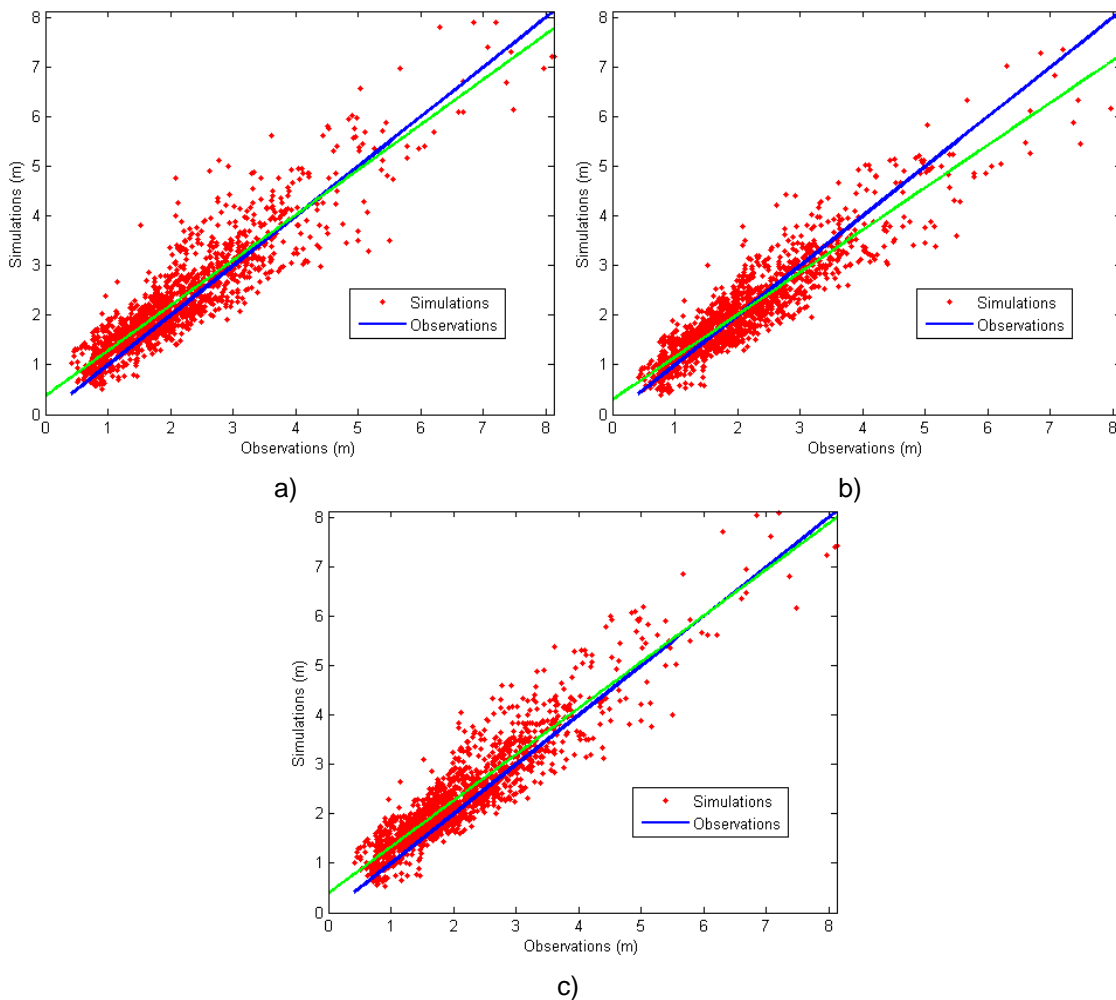


Figura 4 – Gráfico de dispersão para a altura significativa entre dados da bóia de Leixões e os resultados do modelo (área larga), SWAN1 (a), SWAN2 (b), e SWAN3 (c).

Para além da análise quantitativa, foram ainda realizados gráficos de dispersão para a altura significativa (Figura 4). Uma regressão linear foi ajustada aos dados (linha verde) e observa-se que em geral o modelo sobrestima os valores mais baixos, e subestima os valores extremos, SWAN2 sendo o qual mais subestima os extremos (Figura 4b).

Da análise dos parâmetros estatísticos associados à comparação entre o modelo e os dados observados pela bóia de Leixões e considerando também as indicações reveladas pelos gráficos de dispersão da altura significativa, parece que as mais adequadas para a modelação da agitação marítima na área grande são as formulações de SWAN1 e SWAN2. Só estas foram consideradas nas seguintes simulações realizadas na área média.

A seguir foram realizadas simulações na área média, considerando varias combinações de parametrizações na área larga e média, uma descrição dos testes sendo apresentada na Tabela 3. Na Tabela 4 são apresentados os valores dos parâmetros estatísticos associados aos testes e na Figura 5 os gráficos de dispersão para a altura significativa.

Tabela 3 – Testes realizados na área média.

No. Teste	Área	SWAN1	SWAN2
T1	Larga	x	
	Média	x	
T2	Larga	x	
	Média		x
T3	Larga		x
	Média		x

Tabela 4 – Resultados estatísticos (área média).

N=1374	No. Teste	Bias	RMSE	SI	R	S
Hs (m)	T1	0.27	0.52	0.24	0.93	1.11
	T2	0.14	0.41	0.19	0.94	1.05
	T3	0.09	0.39	0.18	0.94	1.03
Tm (s)	T1	-0.59	1.33	0.18	0.82	0.94
	T2	-0.64	1.10	0.15	0.86	0.92
	T3	-0.55	1.03	0.14	0.87	0.93

A análise dos resultados estatísticos apresentados na Tabela 4 indicam que nos testes T2 e T3 foram obtidos os resultados melhores, quer para a altura significativa, quer para o período médio. Só os resultados destes dois testes (T2 e T3) vão ser analisados a seguir.

Os resultados do modelo associados à altura significativa mostram uma correlação significativa com os dados observados (coeficientes de correlação de 0.94), índices de dispersão abaixo de 0.2 e uma sobrestimação ligeira das medições (valores do viés de 0.14 m e 0.09 m, e do declive de 1.05 e 1.03). Relativamente ao período médio, as simulações realizadas na área média continuam a subestimar este parâmetro de onda, mas todos os parâmetros estatísticos apresentam valores melhores.

Fazendo a comparação entre os resultados obtidos na área larga (SWAN1 e SWAN2) versus os resultados dos testes T2 e T3, podemos observar que na área média os valores de RMSE e SI baixaram e os valores de R aumentaram, o que indica de forma nítida que a introdução da segunda área traz um melhoramento dos resultados.

Os gráficos de dispersão apresentados na Figura 5 mostram claramente que no teste T1 todos os valores simulados ficam acima das medições. No caso dos testes T2 e T3 nota-se um ligeiro melhoramento da subestimação dos valores extremos.

Foram realizados também simulações na terceira área de alta resolução. A análise estatística dos resultados obtidos nos testes iniciais não mostrou um melhoramento substancial. Visto que a introdução desta área aumenta o tempo de calculo computacional do sistema, até a inclusão operacional dessa área serão necessários verificações mais amplas, principalmente relacionados com a qualidade dos dados batimétricos utilizados.

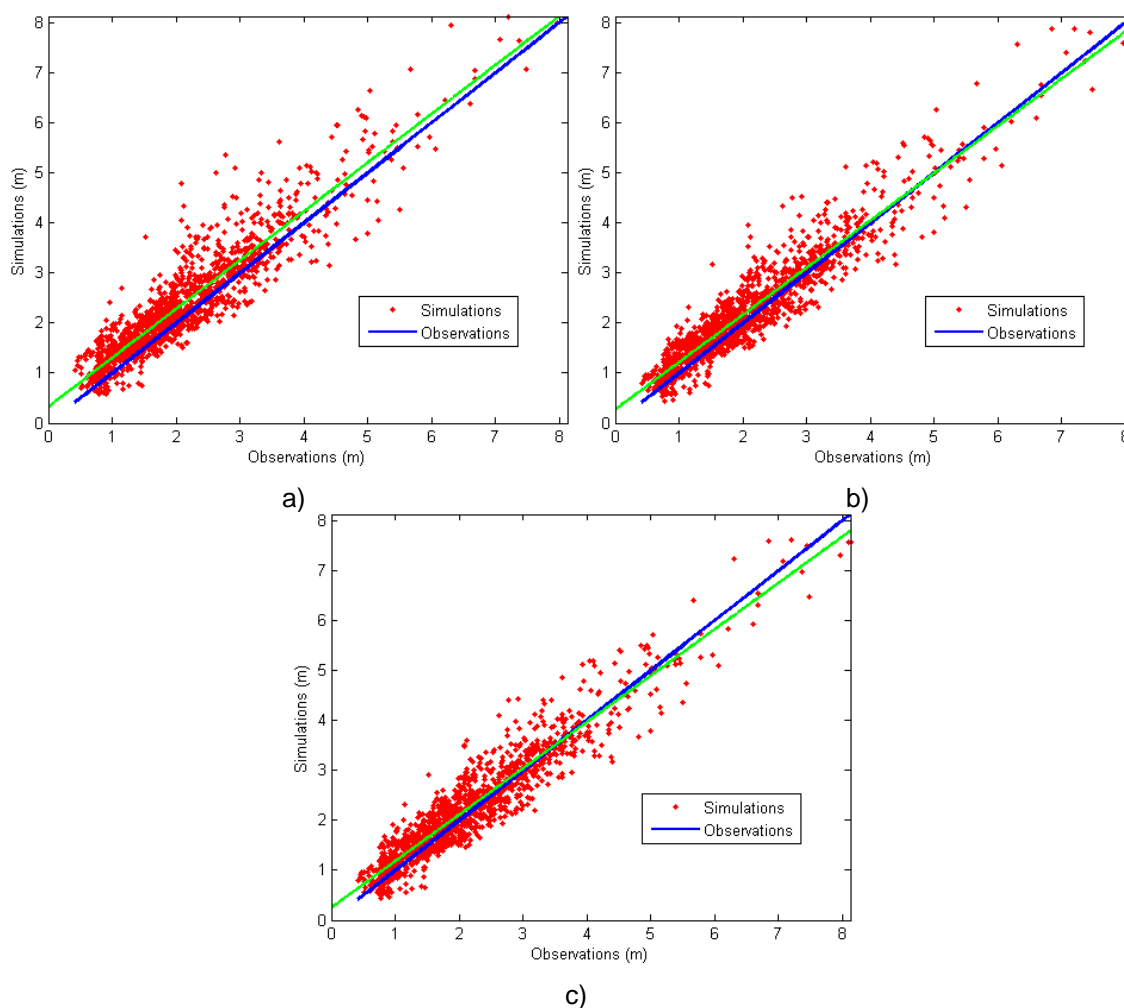


Figura 5 – Gráfico de dispersão para a altura significativa entre dados da bóia de Leixões e os resultados do modelo (área média), T1 (a), T2 (b), e T3 (c).

2.2 Avaliação das previsões de agitação marítima

O sistema de previsão da agitação marítima encontra-se operacional no CENTEC desde Outubro de 2008 e está a fornecer diariamente informação sobre o campo da agitação marítima (altura significativa e direcção média) na costa Portuguesa, com uma resolução temporal de 6 horas. Desde o início da instalação, o sistema de operacional de previsão da agitação marítima sofreu melhoramentos, quer relacionados com a capacidade computacional, quer relacionados com a qualidade dos resultados produzidos. Além disso, fornece também séries temporais das previsões a 4 dias dos parâmetros das ondas, com uma resolução temporal de 3 horas. As figuras 6 e 7 são exemplos da informação que é disponibilizada através de acesso restrito de uma página de Internet.

O modelo SWAN foi também já amplamente validado para a costa Portuguesa (Rusu *et al.*, 2005; Rusu *et al.*, 2008b).

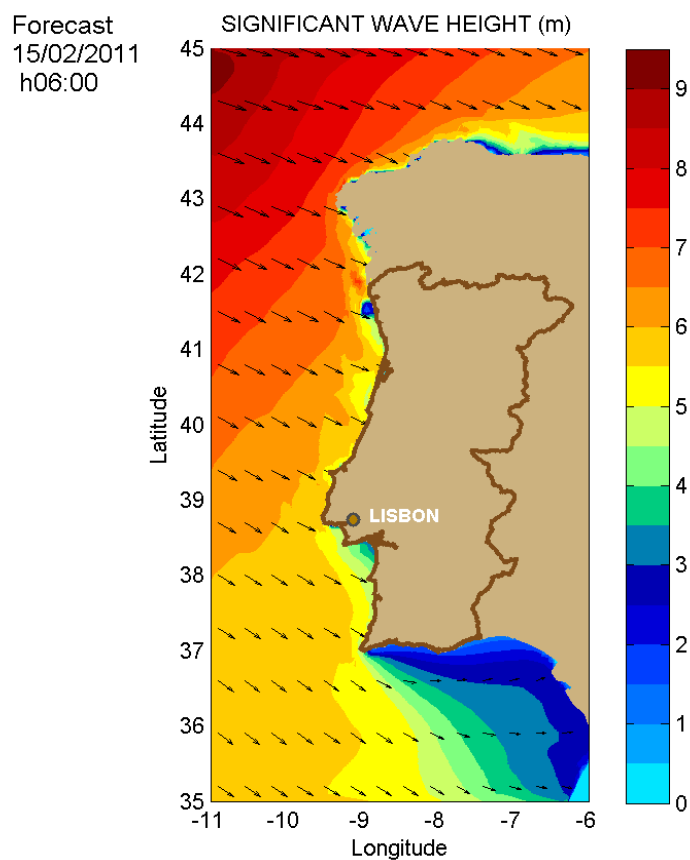


Figura 6 – Campos da altura significativa e direcção média previstos para dia 15 de Fevereiro de 2011, às 06.00h.

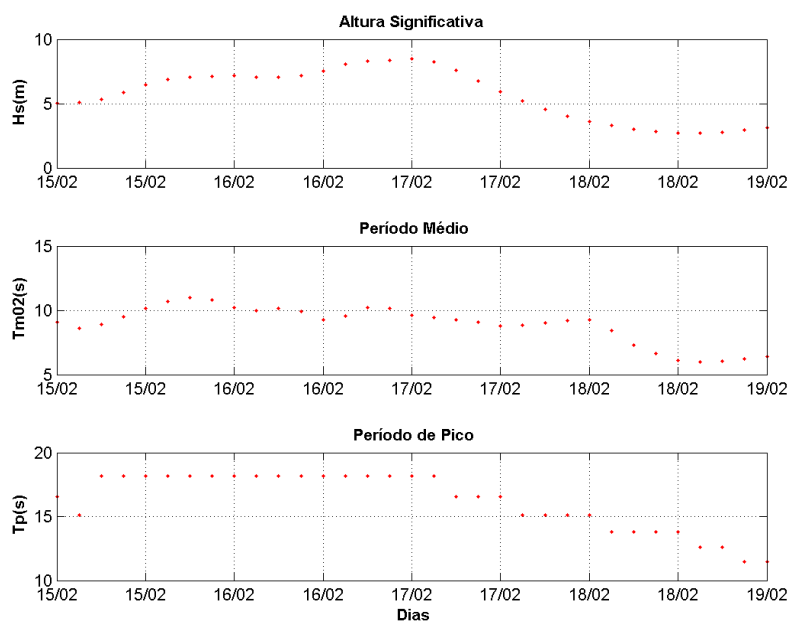


Figura 7 – Séries temporais da altura significativa, período médio e período de pico, previstos para o Porto de Leixões entre 15 e 19 de Fevereiro de 2011.

Visto que as previsões diárias têm um alcance de 4 dias, a avaliação dos resultados será realizada para cada dia de previsão, obtendo-se assim uma visão da qualidade das previsões em função da distância temporal. O esquema ilustrativo da relação existente entre os resultados das previsões e das medições é apresentado na Figura 6. No final do primeiro dia de previsão é guardado um ficheiro que será utilizado para iniciar 'a quente' os próximos 4 dias de previsão.

Os resultados das previsões de agitação marítima foram organizadas em 4 séries de previsões. As previsões que foram simuladas com um alcance de menos de 24 horas constituíam a primeira série designada como previsões a 1 dia. A segunda série contem previsões que foram simuladas com um alcance entre as 24 e as 48 horas e será designada como previsões a 2 dias. A terceira série (um alcance entre as 48 e as 72 horas) e quarta série (um alcance entre as 72 e as 96 horas) serão encontradas com o nome de previsões a 3 dias e 4 dias, respectivamente. A avaliação dos resultados do sistema de previsão foi realizada para cada dia.

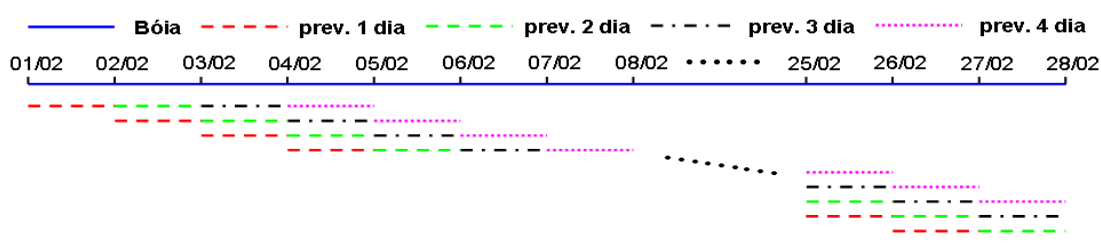


Figura 6 – Esquema ilustrativo da relação existente entre as previsões e observações.

Tabela 5 – Resultados estatísticos entre as observações e as previsões a diferentes alcances.

	N=1374	Bias	RMSE	SI	R	Previsão
SWAN1	Hs (m)	0.18	0.52	0.24	0.91	1 dia
		0.17	0.51	0.24	0.91	2 dias
		0.17	0.53	0.25	0.89	3 dias
		0.14	0.53	0.25	0.89	4 dias
	Tm (s)	-0.98	1.54	0.21	0.79	1 dia
		-1.02	1.58	0.22	0.78	2 dias
		-1.09	1.67	0.23	0.74	3 dias
		-1.07	1.76	0.24	0.70	4 dias
SWAN2	Hs (m)	-0.02	0.43	0.20	0.92	1 dia
		-0.03	0.43	0.20	0.92	2 dias
		-0.03	0.46	0.21	0.92	3 dias
		-0.05	0.48	0.22	0.91	4 dias
	Tm (s)	-0.67	1.16	0.16	0.84	1 dia
		-0.74	1.19	0.16	0.84	2 dias
		-0.76	1.24	0.17	0.82	3 dias
		-0.74	1.31	0.18	0.80	4 dias

A Tabela 5 apresenta os valores dos parâmetros estatísticos associados à comparação entre o modelo e os dados observados pela bóia. Os resultados estatísticos associados a altura significativa, nomeadamente RMSE, SI e R, indicam que a qualidade dos resultados da previsão diminui à medida que aumenta a distância temporal à data em que foi feita a previsão. Para o SWAN1 observa-se que o viés calculado se mantém negativo, e no caso do SWAN2 positivo.

3. CONCLUSÕES

Com a finalidade de investigar e testar o desempenho do modelo operacional de previsão de agitação marítima implementado no CENTEC, foram avaliados os resultados do sistema na área que abrange a entrada do porto de Leixões. Os resultados simulados pelo sistema foram comparados com dados provenientes da bóia colocada da proximidade do porto, durante o período de Outubro de 2010 até Maio de 2011.

Foi realizado um estudo sobre o desempenho das diferentes formulações disponíveis no modelo SWAN para obter a mais favorável para a região de interesse, em termos de altura significativa e período médio. Os resultados obtidos com as formulações utilizadas no teste T2 e T3 mostram a melhor qualidade.

Foram realizadas comparações das séries temporais de previsões a diferentes alcances. Tanto a comparação directa como os resultados estatísticos mostram que o sistema fornece previsões fidedignas, com uma degradação razoável da qualidade à medida que as previsões são mais afastadas.

4. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi feito no âmbito do projecto NEARPORT (Desenvolvimento de um sistema operacional de previsão em tempo real da agitação marítima para os portos portugueses) que foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (PTDC/ECM/64373/2006). A primeira autora foi financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através da bolsa de pós doutoramento (SFRH/BPD/65553 /2009).

Agradece-se ao Instituto Hidrográfico a cedência de dados de bóia de Leixões para o período em causa.

5. REFERÊNCIAS

- Alves, J.H.G.M., Banner, M.L., 2003. Performance of a saturation-based dissipation-rate source term in modelling the fetch-limited evolution of wind waves, *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 1274-1298.
- Bernardino, M., Rusu, L., Silva, D., Bento, A., Pilar, P., Guedes Soares, C., 2009. Avaliação do desempenho do sistema de previsão da agitação marítima implementado para os portos de Sines e Leixões. 6^{as} *Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Funchal, 19p.
- Booij, N., Ris, R.C. e Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions, 1, Model description and validation. *J. Geophys. Res.*, 104, 7649–7666.
- Dudhia, J., Gill, D., Kuo, Y.R., Bourgeois, A., Wang, W., Bruyere, C., Wilson, J. e Kelly, S., 2000. PSU/NCAR Mesoscale Modeling System. MM5 Modeling System Version 3. NCAR Tech. Notes.
- Grell, G.A., Dudhia, J. e Stauffer, D.R., 1994. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale modelling system (MM5). Tech. Note NCAR/TN-398+STR, NCAR.
- Guedes Soares, C., Bernardino, M., Rusu, L., Pilar, P., 2008. Implementação de um sistema de previsão da agitação marítima para os portos de Leixões e Sines. *O Sector Marítimo Português*, C. Guedes Soares e C. Costa Monteiro (Eds.), Salamandra, Lisbon, Portugal, 397-411.

- Guedes Soares, C., Rusu, L., Bernardino, M., Pilar, P., 2011. An operational wave forecasting system for the Portuguese continental coastal area. *Journal of Operational Oceanography*, accepted for publication.
- Janssen, P.A.E.M., 1991. Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *J. Phys. Oceanogr.*, 21, 1631-1642.
- Komen, G.J., Hasselmann, S., Hasselmann, K., 1984. On the existence of a fully developed wind sea spectrum. *J. Phys. Oceanogr.*, 14, 1271-1285.
- Pilar, P., Guedes Soares, C., Carretero, J.C., 2008. 44-year wave hindcast for the North East Atlantic European coast. *Coastal Engineering*, 55, 861-71.
- Rusu, E., Pilar, P., Guedes Soares, C. 2006. Avaliação do modelo SWAN em águas profundas junto à costa de Portugal Continental. Inovação e Desenvolvimento nas Actividades Marítimas, Salamandra Ed., Lisbon, Portugal, 479-490.
- Rusu, L., Pilar, P., Guedes Soares, C., 2005. Hindcasts of the Wave Conditions in Approaches to Ports of the North of Portugal, *The Fifth International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis (WAVES 2005)*, 3-7 July, Madrid, Spain, Paper number 145, CD edition, 9p.
- Rusu, L., Bernardino, M., Guedes Soares, C., 2008a. Influence of the wind fields on the accuracy of numerical wave modelling in offshore locations, *Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2008)*, ASME, Paper OMAE2008-57861, AMER Soc MECHANICAL ENG., New York, 637-644.
- Rusu, L., Pilar, P., Guedes Soares, C., 2008b. Hindcast of the wave conditions along the west Iberian coast. *Coastal Engineering*, 55 (11), 906-919.
- WAMDI Group: Hasselmann, S., Hasselmann, K., Bauer, E., Janssen, P.A.E.M., Komen, G.J., Bertotti, L., Lionello, P., Guillaume, A., Cardone, V.C., Greenwood, J.A., Reistad, M., Zambresky, L., Ewing, J.A., 1988. The WAM Model - A Third Generation Ocean Wave Prediction Model. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775-1810.