

# MODELAÇÃO DA ENERGIA DAS ONDAS NAS ÁREAS PILOTO DA AGUÇADOURA E SÃO PEDRO DE MOEL

*Dina Silva, Paulo Martinho e C. Guedes Soares*

Centro de Engenharia e Tecnologia Naval (CENTEC),

Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal

[dina.silva@mar.ist.utl.pt](mailto:dina.silva@mar.ist.utl.pt); [paulo.martinho@mar.ist.utl.pt](mailto:paulo.martinho@mar.ist.utl.pt); [guedess@mar.ist.utl.pt](mailto:guedess@mar.ist.utl.pt)

## Resumo:

Apresenta-se um estudo de validação de um modelo da energia das ondas nas áreas piloto da Aguçadoura e São Pedro de Moel. O sistema implementado utiliza previsões do modelo atmosférico MM5 para os campos de vento forçadores do SWAN que calcula a agitação marítima na zona costeira utilizando condições de fronteira do WAVEWATCH III, que é utilizado à escala do Atlântico Norte para avaliar a ondulação que chega à zona costeira. Utilizou-se um modelo de grelhas encaixadas em que a primeira área (de baixa resolução) cobre toda a parte Oeste da Península Ibérica fazendo o acoplamento entre o oceano e as zonas costeiras (de maior resolução) escolhidas para as simulações, sendo elas a área da Aguçadoura, de São Pedro de Moel e de Cascais. A área da Aguçadoura foi validada com a bóia de Leixões do Instituto Hidrográfico e a de Cascais com a bóia do Porto de Lisboa. Os resultados são apresentados através de séries temporais, resultados estatísticos e imagem dos campos da energia de ondas.

**Palavras chave:** SWAN, WAVEWATCH III, MM5, modelação de energia das ondas, areas piloto

## 1. Introdução

A energia proveniente das ondas marítimas é abundante e relativamente previsível, podendo-se planejar a sua extracção por conversores de energia. Para planejar a localização destes aparelhos torna-se necessário fazer uma previsão da agitação marítima nos locais de interesse, o que se pode fazer com modelos numéricos forçados por modelos atmosféricos e produzir longos períodos de reconstituição de agitação marítima, do ordem de 40-50 anos, permitindo criar uma base estatística sólida para o oceano e zonas costeiras (Rusu & Guedes Soares 2008).

Portugal tem um potencial de energia substancial, devido à sua localização em altas latitudes e à longa extensão de oceano na zona Oeste (Rusu & Guedes Soares 2008), sendo um alvo para a construção de conversores de energia junto à sua costa. Com conhecimento técnico-científico acerca da energia das ondas, Portugal inaugurou em 2008 um parque para aproveitamento de energia de ondas, o parque de ondas de Aguçadoura ao largo da Póvoa de Varzim, com uma potência instalada de 2,25 MW. Este parque pretende fomentar o desenvolvimento tecnológico e a instalação de equipamentos de aproveitamento de energia das ondas. Outro projecto a decorrer é na zona piloto ao largo de São Pedro de Moel, para uma potência instalada total de 80 MW (Martins 2010).

O SWAN é o modelo mais utilizado para simular a agitação marítima nas zonas costeiras, que calcula a evolução do espectro direccional, permitindo obter estimativas dos parâmetros das ondas nas zonas de profundidade limitada, como no caso de estuários e lagoas (Bento et al. 2010).

Está implementado no CENTEC o sistema Marport que faz previsões diárias de agitação marítima para apoio aos portos de Leixões e Sines (Guedes Soares et al. 2008). Este sistema é baseado em informação produzido por modelos regionais (MM5 e SWAN) forçados por modelos globais (GFS e WAM), com aninhamentos de grelha fina junto à entrada dos Portos.

Rusu e Guedes Soares (2009) adoptaram um sistema semelhante para estudar a energia das ondas em vários locais ao longo da costa Portuguesa, sendo feitas várias validações para diferentes esquemas de funcionamento do modelo SWAN. Silva et al. (2011) adoptaram uma estratégia análoga para o estudo da energia das ondas mas em vez de considerarem o WAM para a escala oceânica, usaram o WAVEWATCH III e validaram o sistema numa área da dimensão da costa de Portugal continental. O presente trabalho da continuidade ao anterior encaixando grelhas mais refinadas nas áreas piloto de Aguçadoura e São Pedro de Moel e procedendo a uma validação das previsões.

## 2. Sistema de previsão

O sistema de previsão implementado resulta de uma interacção de modelos numéricos de 3<sup>o</sup> geração que transferem informação entre si (Guedes Soares et al. 2008, 2011).

O modelo MM5 (Dudhia *et al.* 2000) é utilizado para previsão meteorológica, de área limitada, não hidrostático, com um sistema de coordenadas sigma, adequado para simular ou prever a circulação atmosférica de mesoescala e microescala (Rusu et al. 2008a).

O modelo WW III (Tolman 2009) resolve a equação de transporte de energia, utilizando como entrada campos de vento e de gelo, assim como dados batimétricos.

O modelo SWAN (Booij et al. 1999) permite uma descrição adequada dos processos associados à propagação, geração e dissipação da agitação marítima nas zonas de profundidade limitada, como no caso de estuários e lagoas. A partir do conhecimento das condições de fronteira, dados batimétricos, campos de ventos e de correntes, o modelo calcula a evolução do espectro direccional, o que permite obter estimativas realistas de parâmetros de onda (Bento et al. 2010).

Toda a informação sobre a superfície do mar está contida no espectro de densidade de energia  $E(\sigma, \theta)$ , onde a energia das ondas está distribuída pelas frequências  $\sigma$  (referente a um referencial em movimento com a velocidade de corrente) e direcções de propagação  $\theta$  (normal à crista da onda de cada componente espectral).

Este trabalho pretende estudar a energia das ondas nas áreas piloto da Aguçadoura e São Pedro de Moel. Neste estudo foi desenvolvido um modelo de grelhas encaixadas em que a primeira área (de baixa resolução) alcança toda a parte Oeste da Península Ibérica fazendo o acoplamento entre o oceano e as zonas costeiras (de maior resolução) em estudo. O modelo WW III que cobre toda a bacia do Atlântico Norte, foi utilizado para forçar o modelo SWAN na costa Oeste Portuguesa, estando representado na Figura 1 os domínios de implementação dos modelos.

Os resultados obtidos através das simulações com o modelo SWAN foram utilizados como condições de fronteira para as áreas de maior resolução representadas na Figura 2.

Os campos de vento utilizados para forçar os modelos foram no caso do SWAN o MM5 e no caso do WW III os dados de reanálise do NCEP/NCAR.

As características dos domínios computacionais definidas para as simulações dos modelos WW III e SWAN estão apresentadas na Tabela I e Tabela II respectivamente.

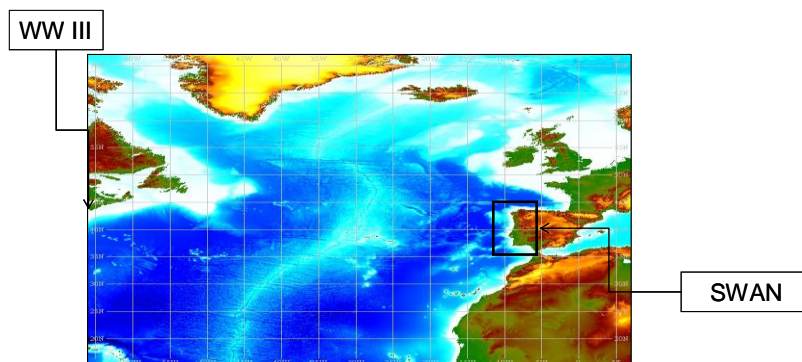


Figura 1-Domínios de implementação dos modelos WW III e SWAN

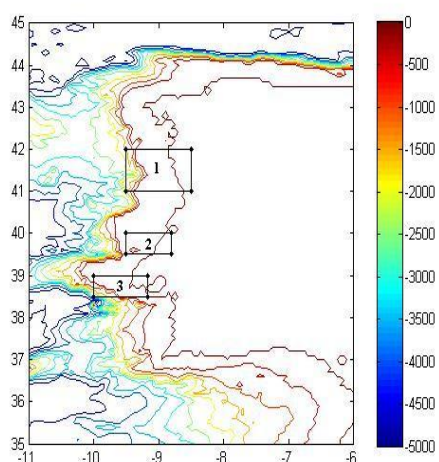


Figura 2-Batimetria de Portugal. Áreas de estudo: 1) Aguçadoura, 2) São Pedro de Moel e 3) Cascais

DOMÍNIO COMPUTACIONAL WW III	LIMITES DE COORDENADAS	$\Delta X \times \Delta Y$	Nº DE PONTOS
Atlântico Norte	13°N-72°N/ 66°W-21° E	1° x 1°	5133

Tabela I- Características dos domínios computacionais para as simulações com o modelo WW III

As simulações com o SWAN foram realizadas no modo não estacionário, para 25 direcções e 24 frequências. As formulações usadas foram as de Komen para a geração das ondas, que descreve a transferência de energia do vento para as ondas, e de Hasselmann para a dissipação por empolamento.

DOMÍNIO COMPUTACIONAL SWAN	LIMITES DE COORDENADAS	$\Delta X \times \Delta Y$	Nº DE PONTOS
Portugal	35°N-45°N/ 11°W-6° W	0.05° × 0.1°	10 201
1 (Aguçadoura)	41°N-42°N/ 9.5°W-8.5°W	0.0083° × 0.0083°	14 400
2 (São Pedro de Moel)	39.5°N- 40°N/ 9.5°W-8.8°W	0.0083° × 0.0083°	5 040
3 (Cascais)	38.5°N-39°N / 10°W-9.2°W	0.0083° × 0.0083°	6 000

*Tabela II- Características dos domínios computacionais para as simulações com o modelo SWAN*

### 3. Análise no domínio temporal

Para avaliar o desempenho do modelo SWAN foi feita uma validação dos resultados das simulações com as bóias ondógrafo de Leixões (do Instituto Hidrográfico) no caso da área da Aguçadoura e de Lisboa (do Porto de Lisboa) no caso da área de Cascais. As suas localizações estão representadas na Figura 3 e as suas posições geográficas na Tabela III.



*Figura 3- Posição das bóias de Leixões e de Lisboa*

Os parâmetros das ondas utilizados nas validações foram a altura significativa ( $H_s$ ) e o período médio ( $T_m$ ). As séries temporais com os dados das bóias e as simulações com o SWAN apresentam-se nas figuras de 4 a 15. O período de tempo escolhido teve em consideração os

dados de bóia e vento disponíveis que fossem coincidentes. Sendo assim para a Aguçadoura o período escolhido foi de Outubro a Novembro de 2009 e Fevereiro de 2010, e para Cascais foi de Janeiro a Fevereiro de 2010. De São Pedro de Moel não havia dados de bóia disponíveis para se proceder à validação mas como esta área se situa entre as duas anteriores (Aguçadoura e Cascais), tendo estas obtido bons resultados, pode-se assumir que para São Pedro de Moel os resultados também são bons.

	LATITUDE	LONGITUDE
Leixões	41.2033°N	9.0883°W
Lisboa	38.6°N	9.38°W

Tabela III- Posição geográfica das bóias

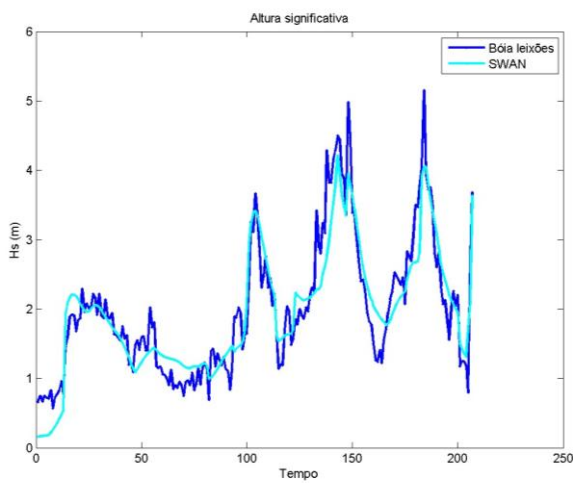


Figura 4 – Série temporal de Hs para Aguçadoura sem aninhamento (Outubro a Novembro de 2009)

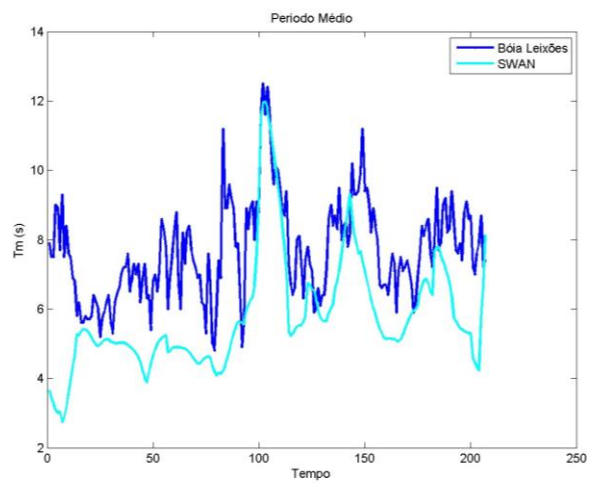


Figura 5- Série temporal do Tm para Aguçadoura sem aninhamento (Outubro a Novembro de 2009)

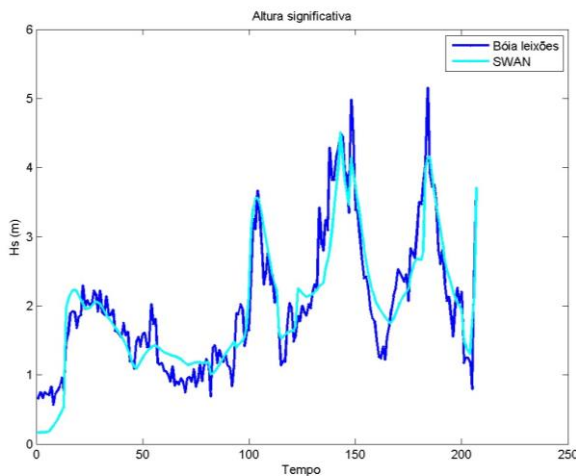


Figura 6- Série temporal de Hs para Aguçadoura com aninhamento (Outubro a Novembro de 2009)

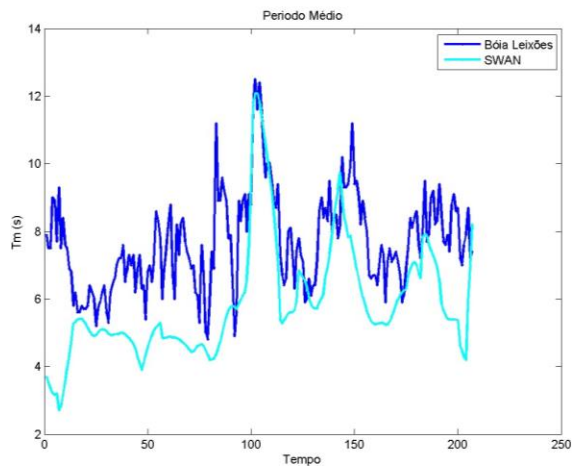


Figura 7- Série temporal do Tm para Aguçadoura com aninhamento (Outubro a Novembro de 2009)

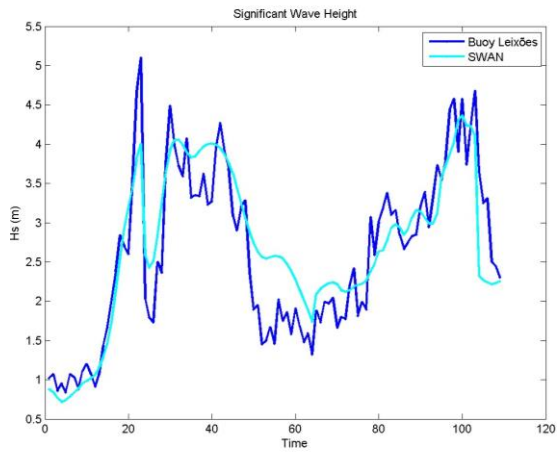


Figura 8 – Série temporal de Hs para Aguçadoura sem aninhamento (Fevereiro 2010)

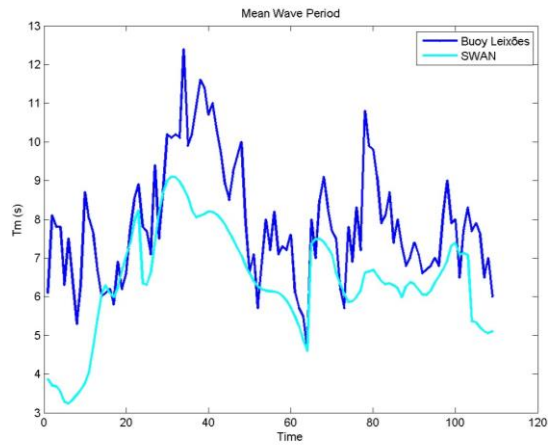


Figura 9 – Série temporal do Tm para Aguçadoura sem aninhamento (Fevereiro 2010)

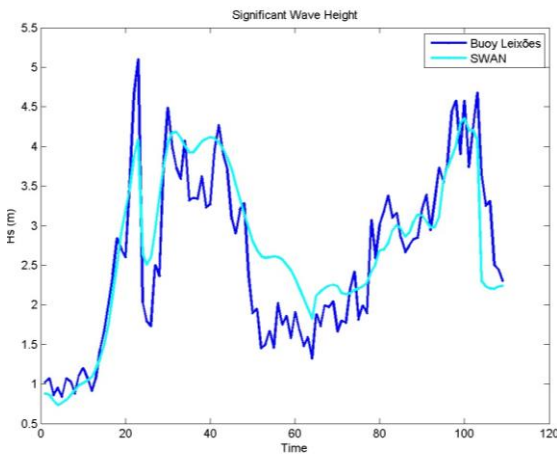


Figura 10 – Série temporal de Hs para Aguçadoura com aninhamento Leixões (Fevereiro 2010)

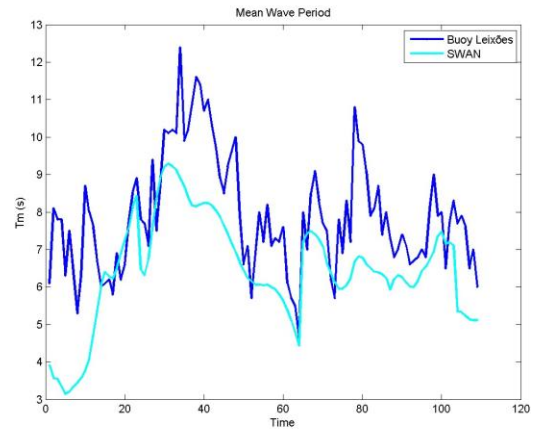


Figura 11 – Série temporal do Tm para Aguçadoura com aninhamento (Fevereiro 2010)

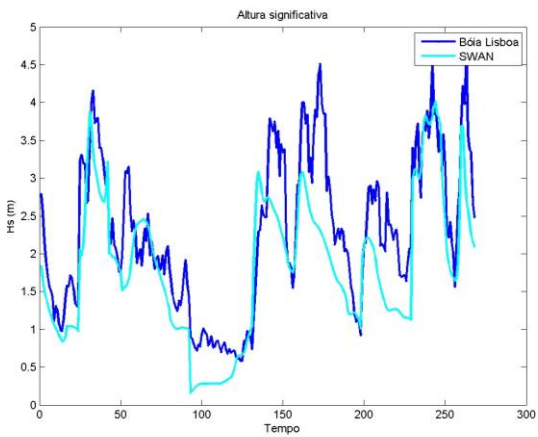


Figura 12 – Série temporal de Hs para Cascais sem aninhamento (Janeiro a Fevereiro 2010)

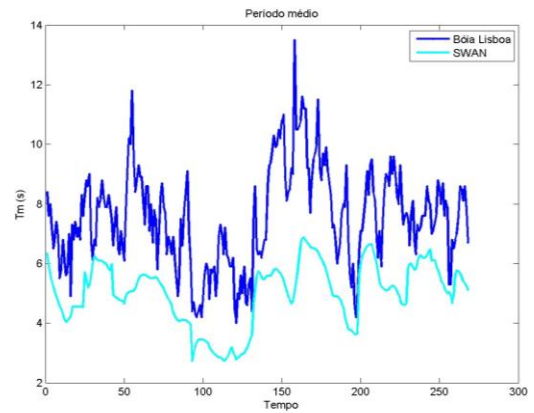


Figura 13 – Série temporal do Tm para Cascais sem aninhamento (Janeiro a Fevereiro 2010)



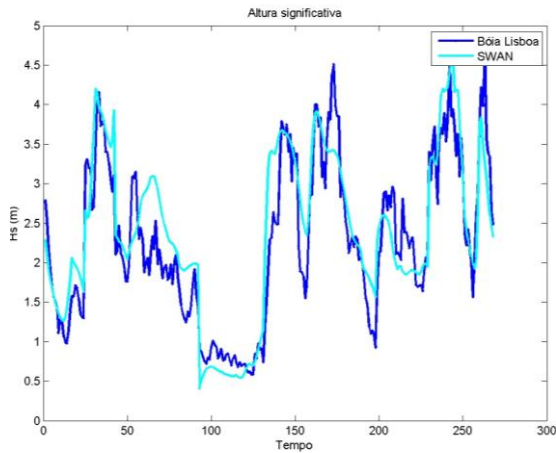


Figura 14 – Série temporal de Hs para Cascais com aninhamento (Janeiro a Fevereiro 2010)

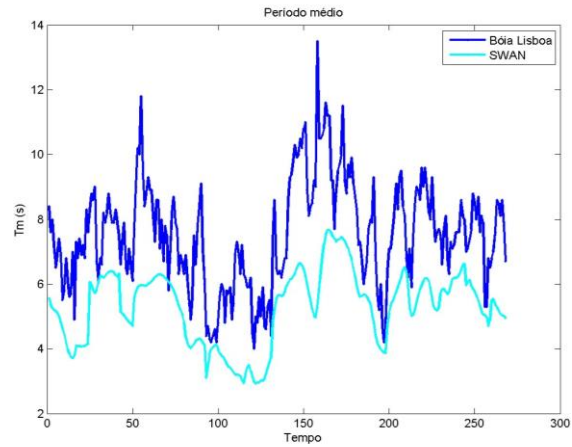


Figura 15 – Série temporal do Tm para Cascais com aninhamento (Janeiro a Fevereiro 2010)

A comparação entre as simulações e os dados das bóias teve por base a análise do RMSE (erro quadrático médio), o Bias (enviesamento), o r (coeficiente de correlação) e o SI (Scatter Index ou índice de dispersão), sendo estes calculados da seguinte forma:

$$B_{med} = \tilde{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad S_{med} = \tilde{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad SI = \frac{RMSE}{\tilde{X}} \quad r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \tilde{X}_i)(Y_i - \tilde{Y}_i)}{(\sum_{i=1}^n (X_i - \tilde{X}_i)^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \tilde{Y}_i)^2)^{1/2}}$$

onde  $X_i$  corresponde às medições das bóias e  $Y_i$  corresponde às simulações com o SWAN.

Os resultados estatísticos correspondentes aos parâmetros de onda estão apresentados nas Tabelas de IV a VII. O  $B_{med}$  corresponde à média dos dados da bóia,  $S_{med}$  à média das simulações e  $n$  ao número de pontos. Os resultados estão divididos em “Sem encaixe”, que corresponde às simulações na costa Oeste Portuguesa, e “Com encaixe”, que corresponde às áreas costeiras (Aguçadoura e Cascais).

BÓIA LEIXÕES		BMED	SMED	BIAS	RMSE	SI	R	N
Outubro a Novembro de 2010	Sem nesting	1.997	1.959	0.038	0.425	0.213	0.908	207
	Com nesting	1.997	1.980	0.017	0.418	0.209	0.909	207
Fevereiro de 2010	Sem nesting	2.630	2.694	-0.064	0.614	0.233	0.841	109
	Com nesting	2.630	2.729	-0.099	0.633	0.241	0.833	109

Tabela IV- Resultados estatísticos relativos ao parâmetro de Hs (área de encaixe corresponde à Aguçadoura)

BÓIA LEIXÕES		BMED	SMED	BIAS	RMSE	SI	R	N
Outubro a Novembro de 2010	Sem encaixe	7.649	5.784	1.865	2.328	0.304	0.603	207
	Com encaixe	7.649	5.859	1.790	2.284	0.299	0.603	207
Fevereiro de 2010	Sem encaixe	7.879	6.418	1.462	1.917	0.243	0.636	109
	Com encaixe	7.879	6.439	1.440	1.915	0.243	0.634	109

*Tabela V- Resultados estatísticos relativos ao parâmetro de  $T_m$  (área de encaixe corresponde à Aguçadoura)*

BÓIA LISBOA		BMED	SMED	BIAS	RMSE	SI	R	N
Janeiro a Fevereiro de 2010	Sem encaixe	2.258	1.811	0.447	0.723	0.320	0.839	268
	Com encaixe	2.258	2.385	-0.126	0.539	0.238	0.871	268

*Tabela VI- Resultados estatísticos relativos ao parâmetro de  $H_s$  (área de encaixe corresponde a Cascais)*

BÓIA LISBOA		BMED	SMED	BIAS	RMSE	SI	R	N
Janeiro a Fevereiro de 2010	Sem encaixe	7.503	5.002	2.501	2.801	0.373	0.642	268
	Com encaixe	7.503	5.281	2.222	2.496	0.333	0.723	268

*Tabela VII- Resultados estatísticos relativos ao parâmetro de  $T_m$  (área de encaixe corresponde a Cascais)*

Analisando as tabelas para o parâmetro de onda  $H_s$  pode-se constatar que os resultados das simulações feitas com o SWAN foram bons.

Para as validações feitas com a bóia de Leixões o Bias apresenta-se positivo para o período de Outubro a Novembro de 2010 e negativo para o período de Fevereiro de 2010, o que significa que o modelo subestimou e sobrestimou respectivamente os valores reais. Relativamente ao RMSE, este apresenta valores entre os 0.63 e 0.42, e o  $r$  valores entre 0.83 e 0.91.

Para as validações feitas com a bóia de Sines o Bias é positivo para as simulações sem aninhamento e negativo para as simulações com aninhamento. Os valores de RMSE variam entre 0.54 a 0.73 e  $r$  de 0.87 a 0.84.

É de salientar que, à excepção da validação dos resultados com a bóia de Leixões para o período de Fevereiro de 2010, os resultados com aninhamento foram melhores do que sem nesting, sendo essa melhoria mais acentuada para a área de Cascais.

Analisando as tabelas para o  $T_m$  pode-se constatar que em todos os casos o Bias é positivo, indicando que o modelo subestima o valor das bóias. O RMSE apresenta valores superiores a 1.9 s e inferiores a 2.8 s. Para  $r$  os valores foram superiores a 0.60 e inferiores a 0.73.



Em todos os casos (Tm) houve uma melhoria dos resultados, apesar de pouco significativa, com nesting.

Os resultados para Hs foram melhores do que para Tm.

#### 4. Análise do Potencial de energia

O SWAN calcula a potência energética das ondas através das componentes de transporte de energia (expressas por W/m, i.e. transporte de energia por unidade de comprimento de frente de onda) dado pelas relações:

$$P_x = \rho g \iint c_x E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$

$$P_y = \rho g \iint c_y E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$

onde x, y são o sistema de coordenadas (para as coordenadas esféricas x corresponde à longitude e y à latitude), e  $c_x$ ,  $c_y$  são as velocidades de propagação da energia das ondas no espaço geográfico definido por:

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = (c_x, c_y) = \vec{c}g + \vec{U}$$

O valor absoluto do transporte de energia é calculado através de (Rusu & Guedes Soares 2008):

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$$

Realizou-se o estudo de energia para a área da Aguçadoura e São Pedro de Moel relativamente ao dia 2009/11/09 às 00h. Foi feita uma avaliação da distribuição espacial da altura significativa e da potência das ondas, estando representadas nas figuras de 15 a 20, incluindo a costa Oeste Portuguesa.

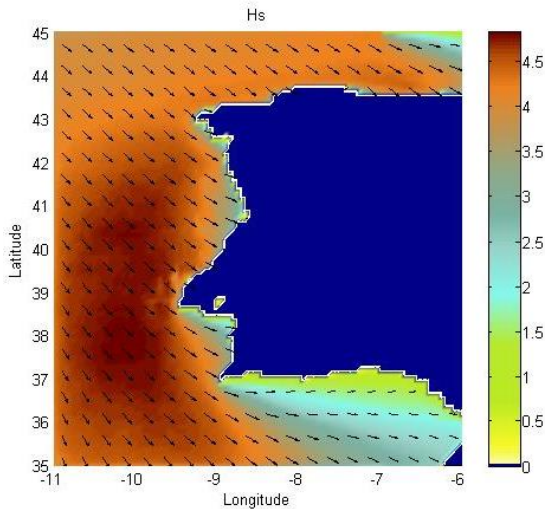


Figura 15- Distribuição espacial de Altura significativa para costa Oeste Portuguesa (no fundo campos de Hs e em primeiro plano vectores de onda)

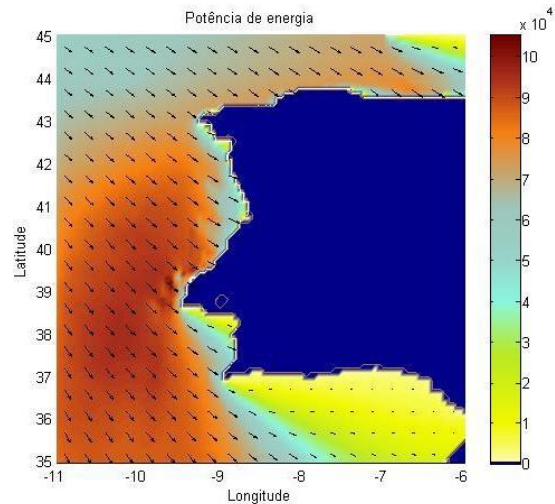


Figura 16- Potência de energia (W/m) para costa Oeste Portuguesa (no fundo campos de energia e em primeiro plano vectores de transporte de energia)

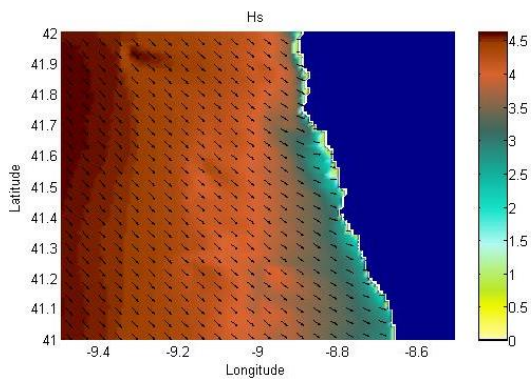


Figura 17- Distribuição espacial de Altura significativa para Aguçadoura (no fundo campos de Hs e em primeiro plano vectores de onda)

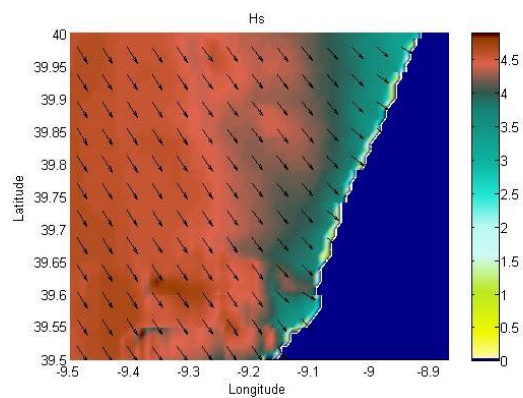


Figura 19- Distribuição espacial de Altura significativa para São Pedro de Moel (no fundo campos de Hs e em primeiro plano vectores de onda)

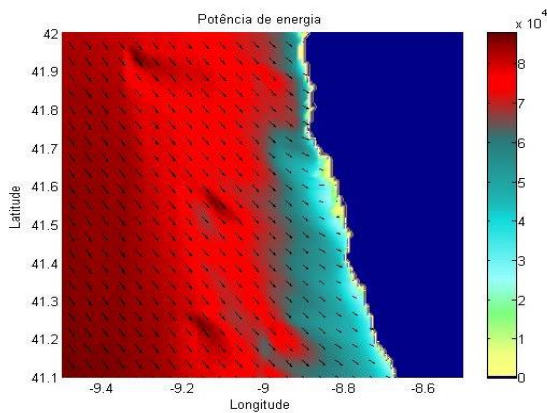


Figura 18- Potência de energia (W/m) para Aguçadoura (no fundo campos de energia e em primeiro plano vectores de transporte de energia)

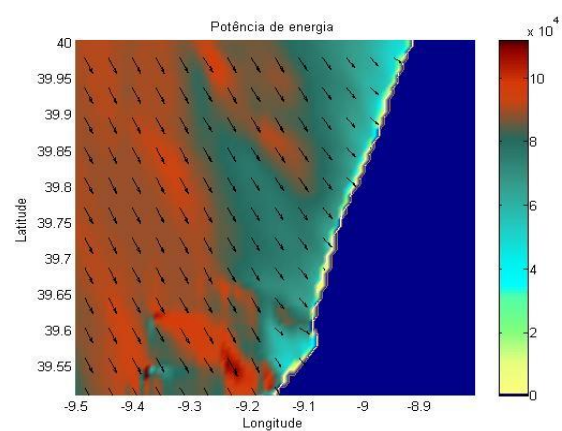


Figura 20- Potência de energia (W/m) para São Pedro de Moel (no fundo campos de energia e em primeiro plano vectores de transporte de energia)

A análise para a costa Oeste Portuguesa já tinha sido feita num estudo anterior (Figuras 15 e 16) (Silva et al., 2011) onde se concluiu que tanto para o parâmetro Hs como para a potência de energia os maiores valores concentram-se no lado Oeste da costa. Olhando para as imagens da distribuição espacial de Hs, pode-se observar que a direcção de ondulação é de NW, diminuindo a altura significativa ao se aproximar da costa. Para ambas as áreas os valores mais elevados de Hs rondam os 4.5 m. No caso da potência de energia, São Pedro de Moel apresenta valores superiores que Aguçadoura, com valores de 90 kW/m vs 70 kW/m.

## 5. Conclusões

No presente trabalho apresenta-se um modelo para a avaliação da energia das ondas na costa Portuguesa, sendo utilizado um modelo de grelhas encaixadas em que a primeira área (de baixa resolução) alcança toda a parte Oeste da Península Ibérica fazendo o acoplamento entre o oceano e as zonas costeiras (de maior resolução) em estudo. Foi utilizado o modelo WW III para fornecer condições de fronteira ao SWAN na área de menor resolução, e para as outras áreas foram utilizadas condições de fronteira do SWAN. Os campos de vento em ambos os casos foram do modelo MM5.

As validações das simulações com o modelo SWAN mostram que, para o parâmetro  $H_s$ , existe uma boa correlação do modelo com os dados das Bóias ondógrafo. Estes resultados apresentam algumas melhorias quando aplicado o nesting nas áreas de interesse, apesar de em alguns casos essa melhoria ser pouco significativa.

Num outro estudo concluiu-se que a energia para Portugal continental concentra-se no lado oeste da costa. Neste, que é a continuação do anterior, verifica-se que os valores de energia para a área de São Pedro de Moel são superiores à Aguçadoura.

## Reconhecimento

O presente trabalho foi feito no âmbito do projecto MAREN – Marine Renewable Energy, Energy Extraction and Hydro-environmental Sustainability, que é financiado parcialmente pelo programa da Área Atlântica.

## Referências

- Booij, N.; Ris, R.C.; Holthuijsen, L. H., (1999), “A third generation wave model for coastal regions. Part 1: Model description and validation”, J. Geophys. Res. 104, C4, pp. 7649-7666;
- Dudhia, J.; Gill, D.; Kuo, Y.R.; Bourgeois, A.; Wang, W.; Bruyere, C.; Wilson, J.; Kelly, S., (2000). PSU/NCAR Mesoscale Modeling System. MM5 Modeling System Version 3. NCAR Tech. Notes;
- Guedes Soares, C.; Bernardino, M.; Rusu, L., and Pilar, P. Implementação de um Sistema de Previsão da Agitação Marítima para os Portos de Sines e Leixões. O Sector Marítimo Português. Guedes Soares, C. e Costa Monteiro, C. (Eds), Lisboa: Edições Salamandra, Lda.; 2008, pp 397-411.
- Guedes Soares, C.; Rusu, L.; Bernardino, M., and Pilar, P. (2011), An Operational Wave Forecasting System for the Portuguese Continental Coastal Area. Journal of Operational Oceanography, (em impressão)
- Martins, A., (2010). “As Parcerias Público-Privadas no Sector das Energias Renováveis – O caso da Energia Eólica”, Dissertação para obtenção do grau de mestre, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal;
- Bento, A.R.; Silva, D.; Rusu, L.; Guedes Soares, C., (2010), “Avaliação da agitação marítima ao largo dos portos de Faro e Setúbal”, 1<sup>as</sup>Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Lisboa, 21-22 de Junho de 2010;
- Rusu, E.; Guedes Soares, C., (2008), “Wave energy assessments in the coastal environment of Portugal continental”. Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2008) Estoril, Portugal. New York, USA: ASME; Paper OMAE2008-57820;
- Rusu, E.; Guedes Soares, C., (2009), “Numerical modeling to estimate the spatial distribution of the wave energy in the Portuguese nearshore”, Renewable Energy 34, pp. 1501-1516;
- Rusu, L.; Bernardino, M.; Guedes Soares, C. (2008). “Influence of the wind fields on the accuracy of numerical wave modeling in offshore locations. Proceedings of the 27<sup>th</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE’2008), ASME Paper OMAE2008-57861;

Silva, D.; Martinho, P.; Guedes Soares, C. (2011), " Modeling wave energy for the Portuguese coast". Proceedings of 1<sup>st</sup> International Conference on Maritime Technology and Engineering, IST, Lisbon, 10-12 of May 2011;

Tolman, H., (2009), "User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14";

The Swan team (2006), SWAN Technical documentation cycle III version 40.51;

WAMDI Group, (1988), "The WAM model-a third generation ocean wave prediction model", Journal of Physical Oceanography, vol. 18, pp. 1775-1810.