

APLICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO SWAN PARA O LAGO DE ILHA SOLTEIRA – BRASIL

Adriana S. Vieira^{1,3}, Conceição Juana Fortes¹, Liliana Pinheiro¹, Geraldo de Freitas Maciel² e Carlos Roberto Minussi³

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, Lisboa, Portugal,
[\(asvieira, jfortes, lpinheiro\)@lnec.pt](mailto:(asvieira, jfortes, lpinheiro)@lnec.pt)

² Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, UNESP, 15385-000 Av. Brasil, 54, Brasil,
maciel@dec.feis.unesp.br

³Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, UNESP, 15385-000 Av. Brasil, 54, Brasil, e-mail:
minussi@dee.feis.unesp.br

Resumo

O sistema em estudo é a barragem do Lago de Ilha Solteira, localizada no interior do estado de São Paulo-Brasil. Este trabalho aborda o comportamento de ondas geradas por ventos em recintos fechados utilizando-se do modelo espectral não-linear numérico SWAN, Booij *et al.* (1996). O trabalho apresentado neste artigo aborda, ou seja, primeiro e terceiro aspectos, a aquisição de dados de campo e de processamento e modelagem numérica de ondas geradas pelo vento. Para caracterizar a hidrodinâmica do sistema e seu impacto sobre as margens da albufeira da barragem de Ilha Solteira, é necessário avaliar o clima de ondas local. Assim, vários instrumentos foram implantados em locais diferentes para caracterizar as ondas e ventos. Estas medidas, apesar de ser muito útil para descrever características das ondas locais, têm uma duração muito curta para caracterizar o clima de ondas de longo prazo. Além disso, eles também sofrem de uma representação do espaço restrito das condições das ondas. A utilização de modelos numéricos de ondas de vento podem superar este aspecto.

1 Motivação

Em se tratando da motivação do trabalho, os reservatórios do oeste Paulista são reservatórios de barragens de usos múltiplos e que fazem parte de segmentos de hidrovias, além de fazer parte de complexos de navegação e rotas comerciais.

Os efeitos produzidos pelo vento são associados à geração de ondas. Há necessidade de metodologias de previsão e monitoramento de ondas para: fins de segurança à navegação, proteção de margens e eventuais áreas de abrigo. Há interesse no estudo dos efeitos das ondas devido à localização da barragem da UHE de Ilha Solteira. Acidentais, já ocorridos na hidrovia Tietê-Paraná, evidenciam a importância de conhecer o fenômeno (MORAIS, 2009).

A partir da medição de ventos locais, e de seu contínuo monitoramento, este artigo tem por objetivo verificar o comportamento do Swan para recintos fechados.

2 Introdução

Os modelos numéricos de propagação de ondas em zonas costeiras e portuárias têm-se apresentado como uma excelente alternativa para a determinação do clima de ondas em regiões carentes desse tipo de informações. São assim utilizados para transferir as características da onda (alturas, direção e período) do largo ou de um local na costa onde sejam conhecidos para o local de interesse de estudo. Dependendo da complexidade do modelo numérico, estes podem incluir diferentes fenômenos que afetam a propagação das ondas em zonas costeiras, tais como, a refração, a difração, a reflexão, a rebentação de ondas, efeitos não lineares e interação onda-corrente.

Um exemplo deste tipo de modelo de geração e propagação de ondas é o modelo SWAN (BOOIJ *et al.* 1996). O modelo SWAN é utilizado para obter estimativas do espectro de ondas em áreas costeiras, lagos e estuários, podendo utilizar campos de vento, batimetria e correntes fornecidos por outros modelos. Foi desenvolvido na Universidade Técnica de Delft (TUDelft), Holanda, e é um modelo numérico de terceira geração que permite obter parâmetros característicos da agitação marítima desde águas profundas a águas pouco profundas. É baseado na equação de balanço espectral da ação de onda, e surgiu da necessidade de complementar os modelos de terceira geração desenvolvidos, essencialmente, para aplicações operacionais em águas profundas. O modelo propaga, no domínio geográfico, o espectro direccional e, conseqüentemente, calcula a evolução das ondas geradas pelo vento em zonas costeiras, considerando vários fenômenos intervenientes na propagação de ondas - refração, rebentação difração (de forma aproximada), geração de harmônicas (interação não-linear entre ondas) - é considerado adequado para grandes áreas costeiras (dezenas de quilômetros). É de domínio público e está disponível a qualquer utilizador.

Uma das grandes vantagens do modelo SWAN é a sua versatilidade: pode ser aplicado a grandes zonas costeiras abertas ou pode ser aplicado a zonas confinadas (como estuários ou albufeiras) e em ambos os casos o forçamento pode ser efectuado por ventos, ondas e/ou correntes. Em ambas as situações, o modelo

efectua a geração e/ou propagação dessas ondas desde o largo até à zona costeira/portuária ou no interior do estuário até à sua rebentação nas suas fronteiras (praias, arribas).

De qualquer forma, a aplicação do SWAN envolve o estabelecimento das características das malhas computacionais, das condições de fronteira e de um conjunto de parâmetros, os quais têm de ser calibrados para cada caso de estudo. É, pois, interessante a aplicação do modelo em situações para as quais existam dados de medição que permitam fazer essa calibração, e avaliar o desempenho do modelo.

É, nesse sentido, que neste trabalho se efectua a aplicação a uma zona confinada, a aplicação do modelo SWAN ao lago da barragem de Ilha Solteira situada no estado de São Paulo, Brasil. Neste caso, o modelo foi utilizado para estudar a agitação gerada pelo vento na albufeira de Ilha Solteira considerando um conjunto de dados de vento disponíveis nessa zona e que cobrem um período com seis meses de duração.

Na presente comunicação, depois desta introdução, apresenta-se uma descrição breve do modelo SWAN ao que se segue a sua aplicação na caracterização da agitação marítima gerada por vento no lago da Ilha Solteira.

3 Modelo SWAN

3.1 Descrição geral

SWAN - *Simulating WAVes Nearshore* - é um modelo numérico para geração, propagação e dissipação da agitação marítima, baseado na equação para a conservação da acção de onda, Booij *et al.* (1996). O modelo SWAN propaga a agitação marítima desde o largo até próximo da costa considerando os processos físicos de refacção, difracção e empolamento devido a variações do fundo e presença de correntes, crescimento de onda por acção dos ventos, rebentação por influência do fundo e por excesso de declividade (*whitcapping*), dissipação de energia devido à fricção do fundo, bloqueio e reflexão por correntes opostas e transmissão através de obstáculos.

O campo de ondas na zona em estudo, descrita por uma malha rectangular, é caracterizado pelo espectro bidimensional de densidade da acção de ondas. Esta representação permite a aplicação em áreas onde o crescimento de ondas pela acção do vento seja notável ou onde estados de mar prévios, ou mesmo ondulação, estejam presentes. A propagação da agitação, nos modos estacionário ou não estacionário, nos espaços geográfico e espectral, é realizada utilizando esquemas numéricos implícitos. A zona em estudo pode ser descrita com coordenadas cartesianas ou esféricas.

3.2 Entrada de dados e resultados

Os dados necessários para a execução do SWAN são o ficheiro da batimetria da zona a modelar e um ficheiro de entrada que define os parâmetros de cálculo do

modelo. Estes estão relacionados com as condições de fronteira, a definição do domínio geográfico, espectral e temporal, caso se introduza a não estacionariedade, os fenómenos físicos a introduzir e o tipo de saída de dados que se encontram descritos correctamente no manual do SWAN, Booij *et al.* 1996.

De entre os vários resultados obtidos pelo SWAN destacam-se a altura significativa, os períodos de pico e médio, as direcções de pico e média, a dispersão direccional, o parâmetro de largura de banda e nível de água em qualquer parte do domínio computacional.

Para a aplicação sistemática do modelo SWAN, utilizou-se o pacote de programas chamado SOPRO-SWAN (FORTES *et al.* 2008). Este pacote é composto por uma base de dados e por uma interface com o utilizador para o modelo numérico SWAN. A interface com o utilizador facilita as operações de armazenamento e manipulação dos dados necessários à execução do modelo SWAN. Também o pós-processamento dos resultados, nomeadamente a visualização dos resultados, é facilitado pela utilização do pacote SOPRO-SWAN.

4 Aplicação do modelo SWAN

Neste capítulo, descreve-se a aplicação do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima gerada pelo vento na albufeira da barragem de Ilha Solteira. Trata-se de uma zona confinada que apenas tem ondas geradas por ventos locais.

Para este caso teste, nas secções seguintes, apresentam-se as condições de cálculo e os resultados numéricos obtidos com o modelo numérico SWAN. Estes resultados, para a lagoa da barragem de Ilha de Solteira, apenas se analisam o andamento dos resultados obtidos para condições de vento entre Julho e Dezembro de 2009.

Os cálculos foram efectuados num PC com quatro processadores AMD Opteron™ 265 de 2.4GHz e com 3GB de memória RAM.

4.1 Lago da barragem de Ilha Solteira

O lago da barragem de Ilha Solteira está situado na cidade de Ilha Solteira a qual é um município brasileiro que pertence a região Noroeste do Estado de São Paulo, a 699 km da Capital. Localiza-se a uma latitude 20°25'58" sul e a uma longitude 51°20'33" oeste, estando a uma altitude de aproximadamente 335 metros. Tal localização, próximo ao encontro dos rios Tietê e Paraná e à divisa com o Estado do Mato Grosso do Sul, é uma das mais importantes da hidrovia Tietê-Paraná, principal meio de transporte do Mercosul.

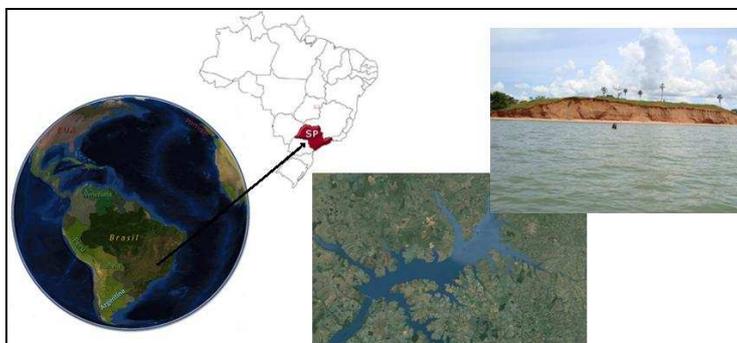


Figura 1: Lago da Barragem de Ilha Solteira.

A recolha dos dados de ondas foi efectuada com uma torre de anemómetros com 6 metros de altura e um perfilador acústico ADCP-Waves (Acoustic Doppler Current Profile). A torre é composta por anemómetros convencionais, tipo conchas, dispostos nas alturas de 0.3, 0.6, 1.2, 2.4 e 4.8 metros e no topo um anemómetro 2D sónico digital. Os dados foram registados num datalogger da Campbell Scientific, modelo CR1000.

Os anemómetros tipo concha foram utilizados para medir a velocidade do vento enquanto o anemómetro sónico 2D mediu os parâmetros de velocidade e direcção. Estes dados foram obtidos a cada minuto, com médias armazenadas a cada 5 minutos.

O objectivo do trabalho nesta secção é obter as características de agitação marítima gerada por ventos locais, para um conjunto de condições de vento colectadas no período de Julho a Dezembro de 2010.

4.1.1 Discretização do domínio de cálculo

O domínio de cálculo do modelo SWAN foi discretizado através de três malhas rectangulares, uma que cobre toda a região da albufeira da barragem de ilha Solteira, Figura 2. A malha maior (global) possui as dimensões 54 km por 33 km, e é composta de unidades quadrangulares de 1000 m de lado. A 2ª malha (encaixada) foi definida com uma resolução de 500 m, cobrindo um rectângulo de 26.6 km por 18.4 km. A 3ª malha (encaixada) foi definida com uma resolução de 250 m, cobrindo um rectângulo de quadrado de 14.8 km por 14.3 km. Na malha encaixada foram definidos 5 pontos P1 a P5, onde se extraíram resultados das execuções do SWAN (Figura 2).

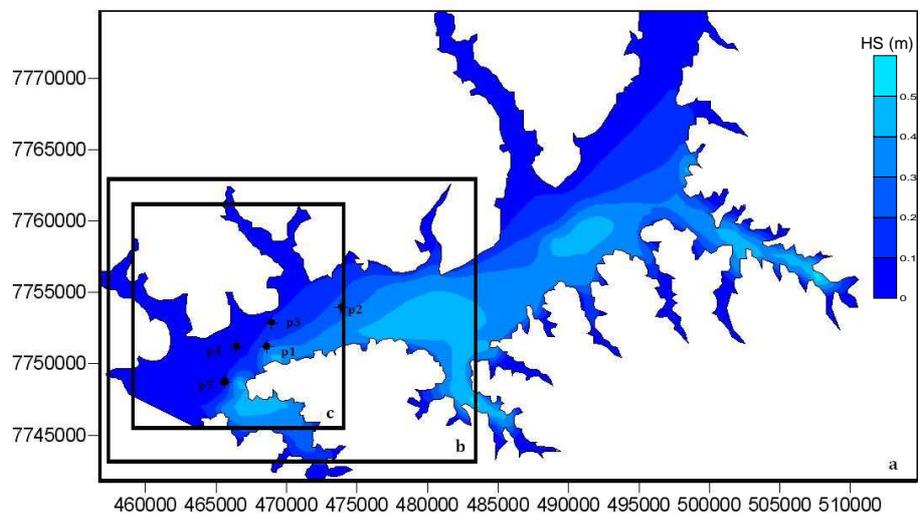


Figura 2: Definição das malhas do modelo SWAN e localização dos pontos na albufeira da ilha solteira para a obtenção dos resultados: a) malha1, b) malha2 e c) malha3.

Tabela 1: Características das malhas utilizadas na simulação com o SWAN.

Malha	X inicial	Y inicial	Nº. DX	Nº. DY	DX (m)	DY (m)
1	456680	7741700	58	33	1000	1000
2	457220	7744520	53	34	500	500
3	459329	7745690	58	57	250	250

Utilizaram-se os dados de vento aos 1.2 m, obtidos com o anemómetro, no período de Julho a Dezembro de 2009, como ilustra a Figura 3 que apresenta a distribuição, por rumos, de valores tri-horários da velocidade do vento.

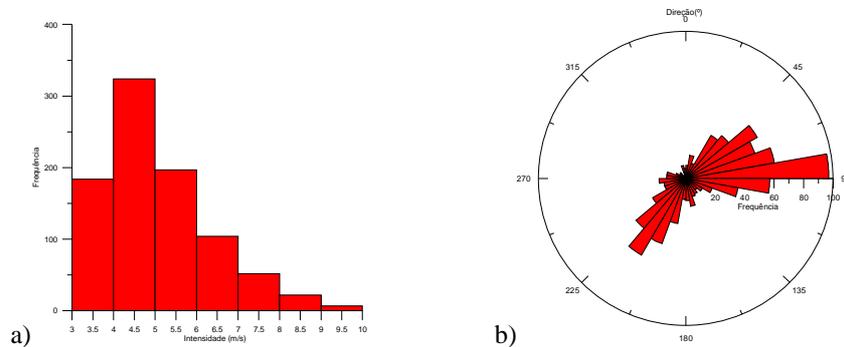


Figura 3: Características do vento no período de Julho a Dezembro de 2009: a) intensidade, b) direcção.

Com base nos dados da estação de São Martinho, verifica-se que rumos mais frequentes são no quadrante N-E seguidos do quadrante S-E.

Para os cálculos do SWAN, o espectro direccional foi definido a partir da discretização de um espectro em frequência contendo 21 intervalos, de 0.070 a 2.0 Hz, com distribuição logarítmica, e de uma discretização em direcção cobrindo os 360°, dividida em 144 intervalos ($\Delta\theta = 2.5^\circ$).

Todas as execuções foram realizadas com a versão 40.72 do SWAN e os fenómenos físicos incluídos foram refracção, o empolamento e a rebentação por influência do fundo e do excesso de declividade (whitecapping), interacções entre triádes de ondas (triad wave-wave interactions) e a geração de harmónicas (frequency shifting).

Para as condições atrás indicadas, foram efectuados os cálculos com o modelo SWAN para as condições de vento de Julho a Dezembro de 2009 e obtiveram-se as características da agitação marítima nos pontos assinalados P1 a P5, ver Figura 2. Quanto ao tempo necessário ao cálculo, uma simulação do SWAN com uma malha (a 1ª malha assinalada na Figura 2) demora cerca de 40 s enquanto que com as três malhas de cálculo mencionadas acima uma simulação demora tipicamente 120 segundos. Meio ano de simulações equivalem a 708 simulações e cerca de 24h, utilizando 3 malhas encaixadas.

4.1.2 Resultados do modelo SWAN

Na Figura 4 apresentam-se os valores da altura de onda significativa e direcção de pico de onda em toda a zona de estudo e em particular na zona próximo ao cume da barragem, para um caso de velocidade do vento extremo 20 m/s numa direcção de 45°.

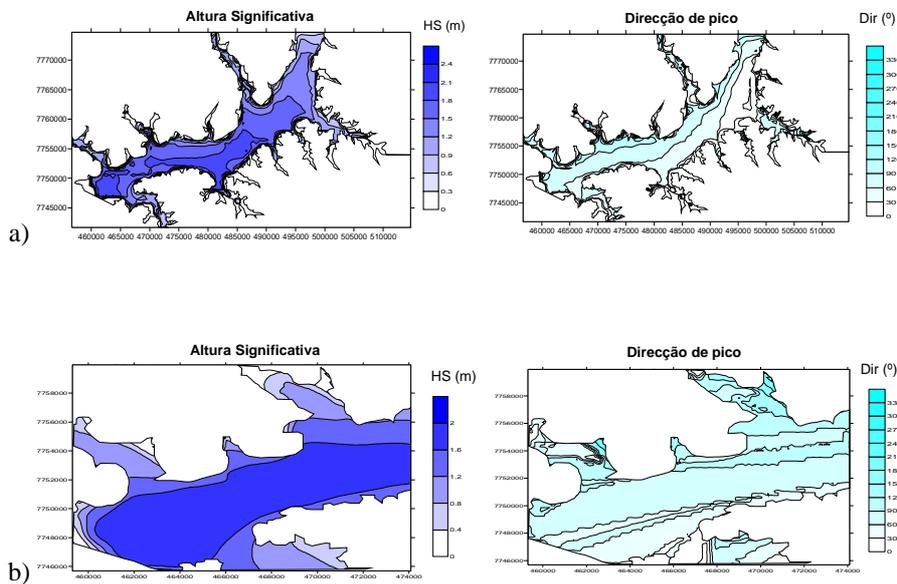


Figura 4: Altura significativa e direcção média da agitação marítima obtidas com o modelo SWAN para vento com velocidade de 20 m/s e direcção 45^o: a) Malha 1 (albufeira); b) Malha 3 (zona da barragem).

Como se pode ver, com um ângulo de incidência do vento de 45 graus e uma velocidade de 20 m/s, obtêm-se ondas máximas de 2 m de altura mais próximas a zona da barragem, enquanto que ao longo da pista de vento essas alturas de ondas variam em média entre 0.4 e 1.6 m. Com relação a as direcções de pico, nota-se que existe uma variação maior entre 60 e 180 graus.

Da Figura 5 à Figura 7, apresentam-se as séries temporais das alturas de onda significativas, período médio de zero ascendente e direcção média, no período que vai de Julho a Dezembro de 2009.

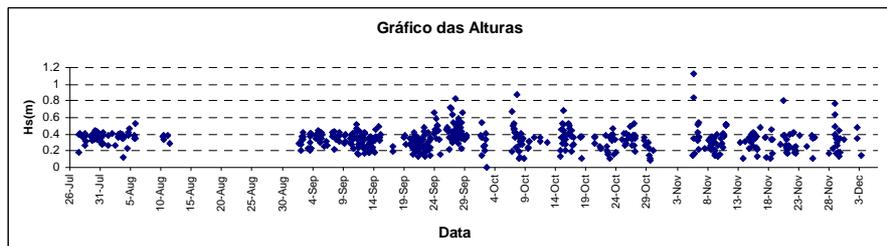


Figura 5: Altura significativa de onda obtidos com o SWAN para o período de Julho a Dezembro.

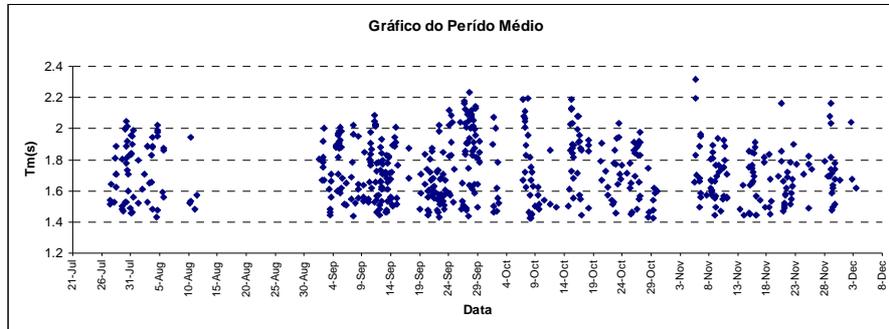


Figura 6: Períodos médios obtidos com o SWAN para o período de Julho a Dezembro de 2010.

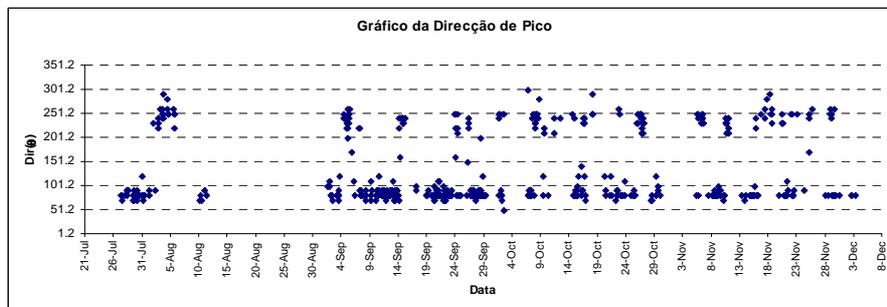


Figura 7: Direcções de onda obtidos com o SWAN para o período de Julho a Dezembro de 2010.

Na Tabela 2 apresenta-se uma análise dos resultados, em termos de média, máximo, mínimo que caracterizam as séries.

Tabela 2: Análise estatística dos resultados do modelo SWAN para o lago da barragem de Ilha Solteira.

	Hi	Tm	Dir_peak
Média	2.563273	1.730554	129.697
Erro Padrão	0.011377	0.008196	3.071825
Mediana	2.448	1.708	80
Moda	2.448	1.779	80
Desvio Padrão	0.269478	0.194128	72.75753

Variância	0.072618	0.037686	5293.658
Curtose	2.733475	-0.75333	-1.02848
Assimetria	1.309535	0.385807	0.915014
Range	1.844	0.892	250
Mínimo	2.213	1.424	50
Máximo	4.057	2.316	300
Contagem	561	561	561

Dos resultados apresentados constata-se que as alturas significativas de onda e períodos médios têm como média 0.23 m, e 1.6 s, valores baixos, o que está de acordo com as velocidades do vento simuladas. Com relação as direcções de pico, observa-se que existe uma maior frequência a 80graus, o que justifica a maior incidência de ventos vindos de norte.

5 Conclusões

Nesta comunicação, descrevem-se a aplicação a uma zona confinada, efectuou-se a aplicação do modelo SWAN ao lago da barragem de Ilha Solteira situada no estado de São Paulo, Brasil. Neste caso, o modelo foi utilizado para estudar a agitação gerada pelo vento numa zona junto à barragem de Ilha Solteira considerando um conjunto de dados de vento disponíveis nessa zona e que cobrem um período de seis meses de duração. Embora não tenha sido efectuada qualquer validação, uma análise qualitativa mostra que os valores do modelo numérico são coerentes.

A obtenção de dados de onda na lagoa de ilha solteira e a posterior validação do modelo numérico constitui o trabalho futuro.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem ao projecto da FCT MOIA (PTDC/ECM/73145/2006). Os dados da agitação marítima foram disponibilizados no âmbito do projecto MacSIMAR (FEDER - Cooperação Transnacional - MAC/1/A089) e resultam da bóia ondógrafo da Praia da Vitória, parte integrante da rede de monitorização meteo-oceanográfica dos Açores, desenvolvida no âmbito dos projectos CLIMAAT, e CLIMARCOST financiados pelo PIC INTERREG_IIIB e pelo Governo Regional dos Açores.

O primeiro autor também agradece a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). E ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento concedido ao doutorando.

7 Referências

- AZEVEDO, E. (2004) - *Project CLIMAAT - Climate and Meteorology of the Atlantic Archipelagos - Interreg_IIB, Mac2.3/A3*.
- AZEVEDO, E.B.; MENDES, P.; GONÇALO, V. (2008) - "Projectos CLIMAAT e CLIMARCOST Clima e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos, Clima Marítimo e Costeiro" - Workshop Intenacional sobre Clima e Recursos Naturais nos Países de Língua Portuguesa -WSCRA08
- BARRERA, C.; AZEVEDO, E.B.; RUEDA, M.J.; M.D. Gelado and O. Llinás (2008) - *Real-time monitoring network in the Macaronesian region as a contribution to the Coastal Ocean Observations Panel (COOP)*, Journal of Operational Oceanography, Vol. 1, Issue.
- BOOIJ, N.R.; HOLTUIJSEN, L.H. e RIS, R.C. (1996) – “The SWAN wave model for shallow water”, in *ICCE’96*, Orlando (USA), 21 - 27 de Julho de 1996, pp. 668 - 676.
- ESTEVES, M.; TOMÉ, R.; MIRANDA, P.M.A.; AZEVEDO, B. (2007): “Desempenho do MM5 em modo operacional: O Furacão Gordon na região dos Açores”, *5º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG*, Peniche, Portugal.
- ESTEVES, R.; VALENTE, A.; COSTA, M.; REIS, F.; AZEVEDO, E. (2009) – “Dados direccionais de agitação marítima nos Açores (Projecto CLIMAAT – Clima e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos)”, *6as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009
- FORTES, C.J.E.M. (1993) – *Modelação matemática da refração e da difracção combinadas de ondas marítimas (análise pelo método dos elementos finitos)*, Dissertação de Mestrado em Eng. Mecânica, IST.
- FORTES, C.J.E.M.; PINHEIRO, L., SANTOS, J.A. (2008) – Acoplagem de modelos numéricos no Pacote SOPRO. 9º Congresso da Água, Estoril, Cascais, 2 a 4 de Abril.
- MORAIS, V.S, “Previsão de Ondas Geradas Por Ventos em Águas Interiores e Sua Alteração Devido à Presença de Vegetação Aquática em Margens de Lagos”. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira-S.P, 2009.
- PALHA, A.C. (2007) – “pyMOIA – Previsão, em Tempo Real, da Agitação Marítima em Zonas Portuárias”, *5as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007 (CD-ROM).
- PINHEIRO, L.V.; FORTES, C.J.E.M.; SANTOS, J.A. e NEVES, M.G. (2006) – “Caracterização de regimes de agitação marítima utilizando a ferramenta SOPRO”, *8º Congresso da Água*, Figueira da Foz.
- SANTOS, J.A.; GUILHERME, L.; FORTES, C.J.E.M.; PINHEIRO, L.; SIMÕES, A. (2009) – “Coupling numerical models for wave propagation in the MOIA package”, *J. Coastal Research*, SI 56, pp. 544-548.

SIMÕES, A. (2006) – “O Clima de Agitação Marítima nas Ilhas da Macaronésia. Um Estudo nos Açores.”, Projectos CLIMAAT e CLIMAAT II, INTERREG IIIB – Açores, Madeira e Canárias, MAC/2.3/A3 – 03/MAC/2.3/A5. – *Comunicação apresentada nas Jornadas Técnicas de Encerramento do Projecto CLIMAAT II*, Funchal.

SIMÕES, A.; TOMÉ, R.; REIS, F.; AZEVEDO, E. (2009) – “Avaliação da Qualidade das Previsões de Agitação Marítima no Arquipélago dos Açores”, Projectos CLIMAAT e CLIMAAT II, INTERREG IIIB – Açores, Madeira e Canárias, MAC/2.3/A3 – 03/MAC/2.3/A5.

TOLMAN, H.L. (1999) – *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18*. NOAA / NWS / NCEP / OMB technical note 166, 110 pp.

TOMÉ, R.; RAMALHO, C.; FERREIRA, J.P.; MIRANDA, P.M.A. (2005): “Previsão do tempo nos Açores com Modelos de Alta Resolução”, *4º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG*, Sesimbra, Portugal.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, J.J.; FEDDEMA, K. M. & KLINK, D. R. (1985) – “Statistics for the evaluation and comparison of models”. *J. Geophysical Research*, 90, 5, pp.8995-9005.