

Precisão Direccional dos Modelos Numéricos de Agitação Marítima

José Cândido, INETI, Lisboa, Portugal

H. Oliveira-Pires, Instituto de Meteorologia, Lisboa, Portugal

M. Teresa Pontes, INETI, Lisboa, Portugal

jose.candido@ineti.pt, oliveira.pires@meteo.pt, teresa.pontes@ineti.pt

Resumo

Neste artigo apresenta-se uma metodologia para efectuar a verificação dos espectros direccionais produzidos pelos modelos de agitação marítima, através da comparação com medidas efectuadas por bóias direccionais.

Os parâmetros espectrais não-direccionais calculados incluem a altura significativa, períodos característicos (de energia, de cruzamento de zeros e de pico) e a potência da agitação.

Os parâmetros direccionais incluem a direcção média global (para todo o espectro de agitação), as direcções médias para as baixas frequências e para as altas frequências (procurando dividir o espectro em duas bandas de agitação), bem como direcções médias por banda de frequência.

Recorre-se ao cálculo de estatísticas das diferenças entre resultados e medidas, incidindo em particular no aspecto direccional com uma proposta para o cálculo dessas estatísticas a partir das direcções médias por banda de frequência. Para os parâmetros direccionais e para os parâmetros não direccionais apresentam-se estatísticas referentes a um ano completo de dados sob a forma numérica e gráfica.

Os resultados são apresentados gráfica e numericamente. No aspecto gráfico, para além da representação unidimensional da informação espectral obtida de modelos e de bóias, recorre-se a uma representação bidimensional dos espectros direccionais produzidos por modelos à qual se sobrepõe de forma conveniente a informação direccional obtida das medidas de bóias.

Os resultados apresentados referem-se a dados do modelo de agitação marítima de 3ª geração WAM, em execução no ECMWF, e a uma bóia situada no Pacífico, ao largo da costa Oeste dos EUA.

1 Introdução

O conhecimento do clima de ondas num determinado local é essencial para um elevado número de propósitos, em particular na adequada avaliação do recurso energético das ondas marítimas, visando possíveis instalações de sistemas de extracção da sua energia, na construção e manutenção de estruturas costeiras ou situadas ao largo, bem como na navegação comercial, de transporte de passageiros ou de recreio. Na actualidade, a informação relativa ao clima de ondas assenta preferencialmente numa descrição paramétrica de fácil utilização, permitindo uma abordagem bastante intuitiva a um utilizador não especializado. Para esse efeito recorre-se a parâmetros de altura, período e, em menor extensão, direcção das ondas, obtidos da análise temporal ou espectral de registos da elevação e inclinação da superfície livre do mar. A análise temporal tem presentemente uma utilização mais restrita, recorrendo-se, habitualmente, à análise espectral dos registos, da qual se obtém o espectro de variância da elevação da superfície livre. A realização de medições *in situ* apresenta limitações e dificuldades de ordem logística e financeira, ocorrendo frequentemente falhas nos registos obtidos. Os modelos numéricos de ondas permitem a obtenção das condições de agitação (espectros direccionais) em malhas de ampla distribuição espacial, gerando previsões de estados do mar com elevada precisão.

As verificações dos resultados dos modelos de agitação marítima têm-se centrado nos parâmetros de altura e, em menor extensão, de período das ondas, não tendo os aspectos direccionais merecido atenção significativa. O conhecimento das características direccionais das ondas é, apesar disso, de considerável importância.

Com o intuito de colmatar a escassez de trabalhos realizados no sentido de avaliar a precisão direccional dos modelos de agitação, desenvolveu-se uma metodologia que permite efectuar essa avaliação de forma satisfatória.

Os modelos de agitação marítima produzem, a partir da resolução da equação de conservação de energia numa determinada bacia oceânica, espectros direccionais a partir dos quais são calculados posteriormente os parâmetros de agitação (análise espectral).

A dificuldade em efectuar medições *in situ* do espectro direccional impossibilita a comparação directa entre os resultados espectrais completos dos modelos numéricos de ondas e as medições na natureza. A metodologia que aqui se apresenta proporciona a comparação entre espectros direccionais produzidos por modelos numéricos e a descrição espectral obtida a partir de medições *in situ*. Procedem-se também à comparação entre as descrições paramétricas obtidas pelos dois métodos. Os parâmetros espectrais não direccionais considerados incluem a altura significativa, períodos característicos (de energia, de cruzamento de zeros e de pico) e a potência da agitação. Os parâmetros direccionais considerados incluem a direcção média global (para todo o espectro de agitação), as direcções médias para uma banda de baixas frequências e para uma banda de altas frequências, bem como direcções médias para cada uma das bandas de frequência em que são discretizados os espectros calculados pelo modelo.

A metodologia apresentada é comostada por representações gráficas das distribuições espectrais obtidas a partir do modelo e da bóia, complementada por comparações dos valores numéricos dos parâmetros. A avaliação gráfica inclui, para além da representação do espectro unidimensional e das distribuições direccionais obtidas do modelo e da bóia, uma representação bidimensional dos espectros direccionais produzidos por modelos à qual se sobrepõe de forma conveniente a informação direccional obtida a partir das medições efectuadas pelas bóias.

Os resultados apresentados referem-se ao modelo de agitação marítima de 3ª geração WAM, em execução no Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo (ECMWF) em Reading, Reino Unido, e à bóia ondógrafo direccional DATAWELL situada ao largo da Ilha de San Nicolas, próxima de Los Angeles na costa Oeste dos EUA.

Na secção seguinte apresenta-se a caracterização da agitação marítima através da descrição espectral e da descrição paramétrica. Seguidamente faz-se uma breve exposição sobre os dados de agitação utilizados no trabalho, após o que se segue a descrição da

metodologia proposta e aplicação aos dados referidos. Por fim são tecidas algumas considerações sobre o que se poderá esperar da metodologia, tendo em consideração os resultados obtidos.

2 Caracterização da agitação marítima

O carácter aleatório da agitação marítima representa um obstáculo ao seu correcto entendimento, pelo que se impõe uma abordagem estatística do fenómeno. Em teoria linear considera-se que o aspecto irregular da superfície do mar resulta da sobreposição de diferentes ondas, podendo ser conceptualmente representada por uma soma infinita de componentes sinusoidais, cada uma das quais com um número de ondas k , frequência f e direcção θ . A elevação da superfície livre do mar η pode então ser expressa por

$$\eta = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp[i(k_n \cos(\theta_n)x + k_n \sin(\theta_n)y - 2\pi f_n t)], \quad (1)$$

em que os A_n representam amplitudes complexas aleatórias, x e y são coordenadas espaciais e t é a coordenada temporal (e.g. Sarpkaya e Isaacson, 1981).

Um estado de mar resulta, muitas vezes, da sobreposição de diferentes regimes de agitação marítima. Na área onde é gerada, sob acção directa do vento, a agitação marítima recebe a designação de *vaga* (*wind-sea* ou *sea* na bibliografia inglesa). A superfície do mar apresenta um aspecto desordenado, rugoso e com uma elevada dispersão direccional. As ondas propagadas para fora desta zona de geração recebem a denominação genérica de *ondulação* (*swell* na bibliografia inglesa). Esta propagação em diferentes direcções, adicionada ao carácter dispersivo das ondas de vento (que se traduz no aumento da velocidade de propagação com o comprimento de onda) vai originar uma aproximação das características da agitação às da onda regular, aproximação essa que maior será quanto mais afastado da zona de geração se situe o local considerado. Num estado de mar por vezes ocorrem vários regimes de ondulação a par de um regime de vaga, habitualmente diferenciáveis por direcções dominantes distintas. A vaga apresenta períodos de onda típicos entre 1 s e 5 s. A ondulação apresenta períodos de onda típicos da ordem de 10 s, podendo os regimes de ondulação longa apresentar períodos típicos de 20 s (Wells, 1997). Não existe, no entanto, uma forma padrão de distinguir com segurança absoluta regimes de ondulação e vaga, sendo necessário, para esse efeito, recorrer a mapas de ventos.

A variância da elevação da superfície livre do mar σ_η^2 pode ser calculada pelo somatório das contribuições das várias componentes,

$$\sigma_\eta^2 = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} S(f, \theta) df d\theta, \quad (2)$$

sendo que $S(f, \theta) df d\theta$ representa a contribuição para a variância σ_η^2 associada a ondas com frequência compreendida entre f e $f + df$, direcção entre θ e $\theta + d\theta$, independentemente do seu número de ondas. $S(f, \theta)$ representa o *espectro direccional* (bidimensional) de ondas do mar, que indica a forma da distribuição da energia do estado de mar em frequência e direcção.

Para caracterizar a distribuição espectral da densidade de energia utilizam-se momentos espectrais. O n -ésimo momento espectral define-se por

$$m_n = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} f^n S(f, \theta) df d\theta, \quad (3)$$

pelo que, de (2), se obtém

$$m_0 = \sigma_\eta^2, \quad (4)$$

ou seja, o momento espectral de ordem zero é idêntico à variância da elevação da superfície livre do mar.

Integrando o espectro direccional $S(f, \theta)$ em ordem a θ obtém-se o espectro unidimensional de frequência $S(f)$,

$$S(f) = \int_0^{2\pi} S(f, \theta) d\theta, \quad (5)$$

que tem tido aplicação habitual em problemas de engenharia. O espectro de frequência corresponde à distribuição da energia das componentes apenas no domínio da frequência, independentemente da direcção. Desta forma, n -ésimo momento espectral exprime-se em função do espectro de frequência por

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df. \quad (6)$$

Habitualmente simplifica-se a caracterização dos estados de agitação marítima através de parâmetros de altura, período e direcção das ondas, de definição análoga à das grandezas geralmente utilizadas para definir uma onda sinusoidal (e.g. Pontes, 1998b).

O parâmetro espectral de altura das ondas geralmente utilizado coincide aproximadamente com a altura significativa H_s (média do terço superior das alturas de ondas), utilizada no âmbito da análise temporal dos registos de agitação marítima, exprimindo-se em função de m_0 como

$$H_{m_0} = 4m_0^{1/2} \cong H_s. \quad (7)$$

Quanto ao período, o consenso não foi ainda atingido, existindo vários parâmetros de habitual utilização. O que corresponderá à noção mais clássica de período de um sinal ondulatório é o período médio de cruzamento de zeros (média dos períodos das ondas individuais limitadas pelo cruzamento de zeros ascendente). Em análise espectral o parâmetro de período correspondente é

$$T_{m_{02}} = \left(\frac{m_0}{m_2} \right)^{1/2}. \quad (8)$$

Como é função da segunda potência da frequência, este período apresenta uma significativa dependência da cauda do espectro (zona das frequências mais altas) que tem menor conteúdo energético e na qual terão maior peso os erros na estimativa da densidade espectral de energia. A sua utilização na actualidade prende-se mais com razões históricas sendo, por isso, pouco apropriada, em particular no que se refere ao estudo do recurso energético. Para esse efeito utilizam-se outros períodos médios, como o período médio de energia T_e , definido por

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0}. \quad (9)$$

Tendo em conta que o período é o inverso da frequência, T_e corresponde a um valor médio do período pesado pela distribuição espectral de energia. Também utilizado, o período de pico define-se como o inverso da frequência de pico, isto é, da frequência correspondente ao valor máximo de densidade espectral de energia,

$$T_p = \frac{1}{f_p}. \quad (10)$$

A partir do período médio de energia T_e e da altura significativa H_s , é possível efectuar o cálculo exacto da potência P em águas profundas através de

$$P = C H_s^2 T_e, \quad (11)$$

em que $C = \rho g^2 / 64\pi$, g é a aceleração da gravidade e ρ a densidade média da água do mar, que para a zona considerada (Pacífico Nordeste) pode ser tomada como $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$. Assim, com H_s expressa em metros e T_e em segundos, a potência em águas profundas (isto é, em situações em que a propagação das ondas não é afectada pela presença do fundo, o que na prática acontece quando a profundidade do local é inferior a metade do comprimento de onda) calcula-se pela fórmula

$$P = 0.4906 H_s^2 T_e, \quad (12)$$

com P expressa em kW/m quando H_s for expresso em metros e T_e em segundos.

A direcção média $\bar{\theta}$ aqui utilizada é, na realidade, a direcção de uma média vectorial da densidade espectral de energia, obtida a partir do espectro direccionado (e.g. Pontes, 1998a) por

$$\bar{\theta} = \arctan \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\infty S(f, \theta) \sin(\theta) d\theta df}{\int_0^{2\pi} \int_0^\infty S(f, \theta) \cos(\theta) d\theta df}. \quad (13)$$

Os dados direccionais fornecidos por bóias são geralmente constituídos pelo espectro de energia $S(f)$, pela direcção média $\theta(f)$ e respectivo desvio padrão $\sigma_\theta(f)$ para cada banda de frequência espectral. Neste caso a direcção média calcula-se através de

$$\bar{\theta}_b = \arctan \frac{\int_0^\infty S(f) \sin(\theta(f)) df}{\int_0^\infty S(f) \cos(\theta(f)) df}. \quad (14)$$

3 Dados

Os modelos de agitação marítima pretendem representar a física dos processos de geração, desenvolvimento, propagação e dissipação das ondas do mar. Os modelos de terceira geração correspondem ao último desenvolvimento no que respeita à modelação neste campo. Ao contrário dos modelos de primeira geração, estes modelos entram em linha de conta com as interacções não lineares responsáveis pela transferência de energia das altas frequências do espectro para as baixas frequências, não sendo necessário assumir *a priori* uma forma espectral, como acontecia nos modelos de segunda geração (Oliveira Pires, 1993).

Os modelos de agitação marítima de terceira geração resolvem, a partir do campo de ventos à superfície de uma determinada bacia oceânica, a equação de conservação de energia nessa bacia, obtendo o espectro direccionado nos nós de uma malha regularmente espaçada sobre a bacia considerada. O primeiro modelo de 3ª geração a ser inserido na rotina de um centro meteorológico foi o modelo WAM (The WAMDI Group, 1988) implementado desde 1987 no Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo (ECMWF) em Reading, Reino Unido. Os espectros direccionais calculados de 6 em 6 horas pelo WAM são descritos em 30 bandas de frequência entre 0.0345 e 0.5476 Hz (valores centrais das bandas), com acréscimos de 10% ($f(i) = f(i-1) \times 1.1$), e em 24 bandas direccionais entre 7.5° e 352.5°, com largura constante de 15° (valores centrais das bandas).

Os sistemas mais vulgarmente utilizados na medição *in situ* das características direccionais das ondas são as bóias direccionais e conjuntos de sensores de pressão

submersos. Como foi já referido, a partir das medições efectuadas por estes sistemas geralmente obtém-se $S(f)$, a direcção média por banda de frequência $\theta(f)$ e o respectivo desvio padrão $\sigma_\theta(f)$. Outro processo consiste na utilização do SAR (Synthetic Aperture Radar) a bordo de satélites. Os satélites mais recentes que incluíram o SAR foram o ERS-2 da Agência Espacial Europeia e o seu substituto ENVISAT, bem como o JASON que recentemente substituiu o satélite Americano/Francês TOPEX/Poseidon (Gonçalves *et al.*, 2002).

As bóias ondógrafo direccionais DATAWELL registam o deslocamento vertical da superfície livre η_1 (resultante da integração em ordem ao tempo da aceleração vertical) e os declives η_2 e η_3 relativamente a duas direcções horizontais x e y perpendiculares entre si, obtendo assim as séries temporais $\eta_1(t)$, $\eta_2(t) = \frac{\partial \eta_1(t)}{\partial x}$ e $\eta_3(t) = \frac{\partial \eta_1(t)}{\partial y}$ (I.H., 1994). O espectro direcciona $S(f, \theta)$ pode ser desenvolvido em série de Fourier, para cada frequência f ,

$$S(f, \theta) = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2} A_0(f) + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n(f) \cos n\theta + B_n(f) \sin n\theta) \right], \quad (15)$$

sendo os coeficientes de Fourier definidos pelas expressões

$$A_n(f) = \int_0^{2\pi} \cos n\theta S(f, \theta) d\theta, \quad (16)$$

$$B_n(f) = \int_0^{2\pi} \sin n\theta S(f, \theta) d\theta. \quad (17)$$

A partir das funções de covariância de $\eta_1(t)$, $\eta_2(t)$ e $\eta_3(t)$, são estimados os cinco primeiros coeficientes de Fourier (Goda, 1985). No entanto estes cinco coeficientes não são suficientes para uma caracterização completa do espectro direcciona, sendo, porém, a única informação disponível para estimar as características direccionais da agitação marítima. A estimativa do espectro direcciona assim obtida representa o desenvolvimento em série de Fourier infinita da equação (15) apenas até aos termos de segunda ordem, sendo, por essa razão, uma estimativa desviada do verdadeiro espectro.

A presente verificação do modelo WAM do ECMWF foi efectuada para o local ao largo da Ilha de San Nicolas, perto de Los Angeles na costa Oeste dos EUA (Pacífico), com coordenadas 33.22° N, 119.88° W, e profundidade de 365 metros, durante o período que decorreu de 1 de Janeiro de 2001 a 31 de Dezembro de 2001. Nesse local e durante o período referido esteve instalado um ondógrafo direcciona DATAWELL pertencente ao Coastal Data Information Program operado na Scripps Institution of Oceanography (US Army Corps of Engineers, California Department of Boating and Waterways). O nó da malha do modelo WAM, domínio Global, correspondente a esta localização tem coordenadas 33° N, 120° W.

A aquisição de dados é efectuada pela bóia a uma taxa de 1.28 amostras por segundo, posteriormente agrupadas em blocos de 200 segundos. Em cada registo dispõe-se de 4 a 8 blocos de 256 dados de cada tipo (elevação e declives) - os dados utilizados no presente trabalho são constituídos por amostras com 1600 segundos de duração, tomadas de 30 em 30 minutos. Os espectros unidimensionais em frequência $S(f)$ e as distribuições da direcção média $\theta(f)$ são discriminados em 64 bandas de frequência, com valores centrais de banda compreendidos entre 0.025 e 0.580 Hz. Na gama compreendida entre 0.025 e 0.095 Hz as bandas têm uma largura de 0.005 Hz, a banda correspondente ao valor central 0.100 Hz tem largura 0.0075 Hz, e entre 0.110 e 0.580 Hz a largura das bandas é 0.010 Hz.

4 Metodologia

Uma vez que a estação direccional DATAWELL não estabelece uma descrição completa do espectro de ondas direccional, ao contrário do que acontece com o modelo numérico de agitação marítima (que produz representações discretas do espectro direccional $S(f, \theta)$), procurou-se criar uma forma expedita de comparar os dados obtidos de uma e outra forma, negligenciando o mínimo possível de informação em qualquer um dos casos. Atendendo a que se trata de medições, os dados referentes à estação direccional são tidos, neste contexto, como a "verdade", sendo os resultados do modelo numérico estimativas cuja precisão se pretende avaliar.

Na presente proposta procede-se à comparação entre o espectro direccional $S(f, \theta)$ calculado pelo modelo e os dados obtidos a partir das medições com bóias direccionais, isto é, o espectro de frequência $S(f)$ e a distribuição da direcção média por banda de frequência $\theta(f)$. Procede-se também à comparação entre as descrições paramétricas. Em particular, são comparados valores da direcção média global obtida a partir do modelo $\bar{\theta}_m$ (equação (13)) com valores da direcção média global obtida das medições *in situ* $\bar{\theta}_b$ (equação (14)). Efectuou-se ainda o cálculo dos parâmetros de altura e período, bem como a potência, apresentados na secção 2, utilizando tanto as estimativas do modelo como as medições da bóia, para posterior comparação.

A fim de avaliar a precisão direccional do modelo para ondulação e vaga em separado, dividiu-se o espectro em duas bandas, uma de alta frequência (baixo período), para valores de frequência superiores a 0.125 Hz (valores de período inferiores a 8 s), correspondendo conceptualmente a vaga, e uma de baixas frequências (elevados períodos), para valores de frequência inferiores a 0.125 Hz (valores de período superiores a 8 s), correspondendo conceptualmente a ondulação. Para cada uma destas bandas calculou-se a direcção média de forma equivalente à apresentada para a direcção média global (expressão (13), no caso do modelo, expressão (14), no caso da bóia).

A precisão das estimativas dos parâmetros direccionais produzidas pelo modelo de agitação marítima foi avaliada através de parâmetros de erro usuais. Sendo o erro ou desvio entre valores calculados X_c e medidos X_{obs} definido por $E_i = X_c - X_{obs}$, os parâmetros de erro utilizados são o viés,

$$V = \bar{E}_i = \overline{X_c - X_{obs}}, \quad (18)$$

e o erro médio quadrático,

$$E_{rms} = \sqrt{\bar{E}_i^2} = \sqrt{\overline{(X_c - X_{obs})^2}}. \quad (19)$$

5 Resultados

Nesta secção apresentam-se alguns exemplos de verificação dos resultados do modelo WAM seguindo a metodologia acima descrita, utilizando medições efectuadas pela bóia direccional situada ao largo da costa oeste dos EUA, como definido acima.

Em cada cenário são apresentados dois tipos de gráficos. O gráfico da esquerda contém a representação polar do espectro direccional calculado pelo modelo, através de um conjunto de isolinhas (linhas fechadas a azul) de $S(f, \theta)$ (iguais níveis de densidade de energia). Na direcção radial representam-se os valores da frequência, sendo que a distância de cada ponto ao centro do diagrama, r , determina o valor da frequência: quanto maior for a distância ao centro maior é o valor de frequência. Assim sendo as circunferências a cinzento representam linhas de igual frequência (a circunferência cinzenta mais interior corresponde à frequência de 0.1 Hz e a circunferência mais exterior corresponde à frequência de 0.4 Hz). O ângulo com o eixo vertical, θ , determina a direcção média para cada banda de frequência. Adopta-se aqui a

convenção meteorológica invertida, isto é, a direcção Norte corresponde a 0° , com os valores de direcção crescentes no sentido dos ponteiros do relógio, de forma tal que o Sul corresponde a 180° e o Oeste a 270° . A direcção de um vector $S(f, \theta)$ no diagrama corresponde à direcção para a qual essa componente se desloca e não à direcção de onde provém (ou seja, uma componente com direcção de noroeste para sudeste corresponderá, nestes diagramas, a um ponto localizado no quadrante Este – Sul ($90^\circ - 180^\circ$)). Nos diagramas polares, à representação do espectro direccionado calculado pelo modelo, sobrepõe-se a distribuição da direcção média por banda de frequência $\theta_b(f)$ obtida a partir das medições da bóia. Esta distribuição apresenta uma elevada variabilidade, pelo que se opta por representar a distribuição da média móvel de $\theta_b(f)$, denotada por $\overline{\theta(f)}_d$ (linha vermelha).

O gráfico da direita, em coordenadas cartesianas, apresenta

(i) a comparação entre o espectro de frequência $S(f)$ obtido a partir do modelo (linha contínua azul) e o espectro de frequência $S(f)$ obtido a partir das medições da bóia (linha contínua vermelho) e

(ii) a comparação entre as distribuições da direcção média por banda de frequência $\theta(f)$ obtidas do modelo (linha azul a tracejado) e pela bóia (linha vermelha a tracejado); no caso da bóia optou-se por utilizar os valores de uma direcção média por banda de frequência do modelo, uma vez que as bandas de frequência do modelo são, em geral, mais largas do que as da bóia, por forma a obter distribuições com a mesma discretização em frequência.

Os cenários incluem ainda duas tabelas, a primeira com a comparação entre os valores de H_s , T_e , T_p e P , e a segunda com a comparação entre os valores da direcção média para todo o espectro e para as zonas de alta frequência ($T \leq 8$ s) e baixa frequência ($T > 8$ s). O viés V e o erro médio quadrático E_{rms} , referentes aos valores destas direcções médias, são calculados por (18) e (19).

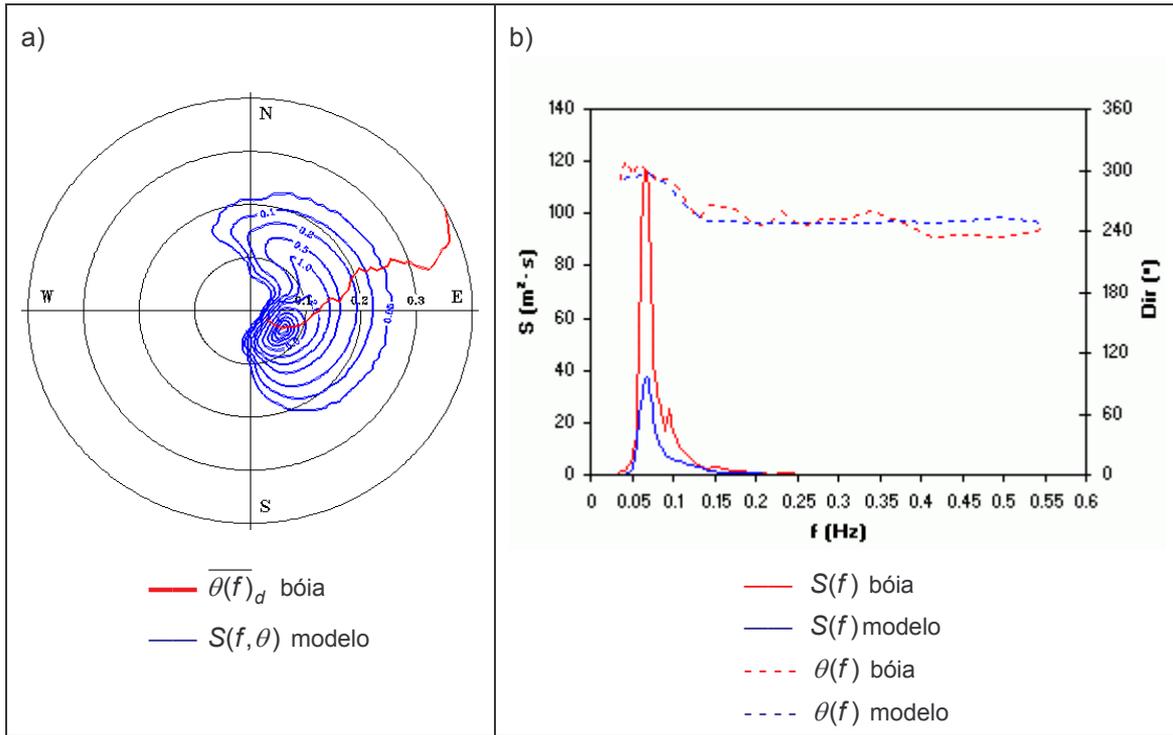
No primeiro exemplo (Cenário 1) apresenta-se uma situação de tempestade, com altura significativa medida pela bóia de 6.86 m. Os picos acentuados dos espectros de frequência (diagrama b)) ilustram esta situação, observando-se, tanto no valor da altura significativa como no valor do pico espectral, uma subestima significativa por parte do modelo. Frequentemente os modelos de terceira geração subestimam a altura significativa das ondas em situações de temporal. Apesar disso existe um acerto razoável entre o espectro de frequência calculado pelo modelo e o espectro de frequência medido pela bóia, com um ligeiro desvio do valor do período de pico estimado pelo modelo em relação à medição. É um espectro regular típico de ondulação, com o pico localizado na zona de baixas frequências ($T_p = 15.4$ s) (diagrama b)).

Como o valor da potência das ondas depende do valor da segunda potência da altura significativa, o valor estimado pelo modelo é consideravelmente inferior ao da medição. A direcção predominante da agitação marítima é de Oeste-Noroeste, apesar de se observar, nos resultados do modelo, a existência de componentes de baixo conteúdo energético provenientes do quadrante Sul – Oeste (diagrama a)). No entanto estas componentes não são visíveis no diagrama b), uma vez que são “mascaradas”, no cálculo das direcções médias por banda de frequência, pelas componentes com maior conteúdo energético presentes nas mesmas bandas de frequência (zona de baixas frequências). Uma vez que se trata de uma situação de ondulação típica, com conteúdo energético quase exclusivamente concentrado na zona de baixas frequências, o valor da direcção média para esta banda é consideravelmente mais próximo do valor da direcção média global do que o valor da direcção média para as altas frequências. A direcção média para as baixas frequências também é de Oeste-Noroeste e a direcção média para as altas frequências é de Oeste-Sudoeste (correspondente, por certo, à direcção predominante do vento local). De forma bastante razoável este comportamento direccionado pode ser observado tanto nos resultados do modelo como nas medições, uma vez que neste caso é elevada a precisão direccionada do modelo, como se pode observar tanto nos valores das estatísticas direccionais como em ambos os diagramas. De facto, no diagrama a), a linha a vermelho, que representa a distribuição da direcção média por banda de frequência da bóia, passa bem no centro da zona de maior representatividade energética do espectro

Cenário 1 – Comparação entre resultados do modelo WAM e medições efectuadas pela bóia de San Nicolas Island para as 0 horas do dia 12/01/2001.

- a) Diagrama polar incluindo as isolinhas do espectro direccionado produzido pelo modelo WAM e a distribuição da média móvel da direcção média por banda de frequência da bóia $\theta_b(f)$;
- b) Comparação de $S(f)$ e da direcção média por banda de frequência;
- c) Tabela comparativa de parâmetros não direccionais;
- d) Tabela comparativa de parâmetros direccionais incluindo parâmetros de qualidade dos resultados do modelo.

WAM
San Nicolas Island - 2001/01/12, 0h00



c)

	H_s (m)	T_e (s)	T_z (s)	T_p (s)	P (kW/m)
modelo	4.28	13.0	10.9	14.9	116.6
bóia	6.86	13.5	11.2	15.4	311.0

d)

	Direcção (°)									
	Média $0.025 \leq f \leq 0.58$			Altas frequências $0.125 \leq f \leq 0.58$			Baixas frequências $0.025 \leq f < 0.125$			
		V	E_{rms}		V	E_{rms}		V	E_{rms}	
modelo	288.4	-4.6	6.3	251.1	-6.6	10.2	291.4	-4.5	5.9	
bóia	293.8			257.4			296.5			

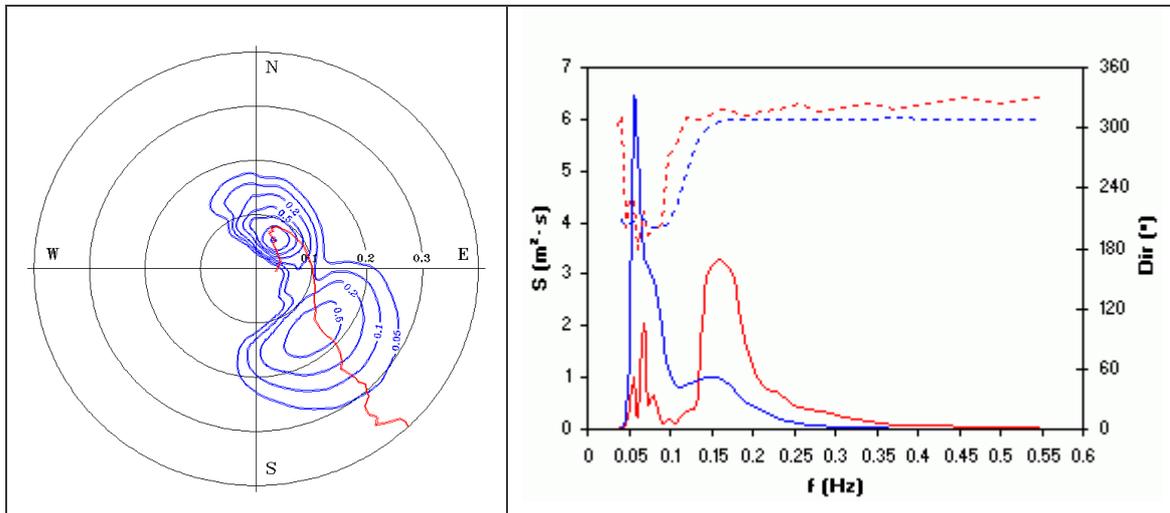
directional estimado pelo modelo, a azul; no diagrama b) as linhas a tracejado, da direcção média por banda de frequência, acompanham-se bem. As maiores diferenças ocorrem na banda de altas frequências (em particular para $f > 0.35$ Hz), que apresenta menor energia e

que, por isso, exerce menor influência nos resultados da direcção média global. Em geral, em situações semelhantes, com a presença de um sistema de ondulação predominante, as estimativas direccionais do modelo revelaram-se satisfatórias.

O segundo exemplo (Cenário 2) representa uma situação mais complexa, em que coexistem dois sistemas distintos. O sistema localizado na zona de baixas frequências tem direcção predominante de Sudoeste, tratando-se, certamente, de um sistema de ondulação. O outro sistema, localizado na zona de altas frequências, é, por certo, um sistema de vaga com direcção predominante de Noroeste. Em qualquer dos diagramas é possível observar a ocorrência destes dois sistemas tanto nos resultados do modelo como nas medições pela bóia. Note-se a sobrestima do sistema de ondulação por parte do modelo e subestima do sistema de vaga. De facto os valores dos diversos parâmetros de período das ondas medidos pela bóia são consideravelmente inferiores aos calculados pelo modelo, significando isso que o modelo identifica como regime predominante a ondulação de Sudoeste e a bóia mede como regime predominante a vaga de Noroeste. Este facto é, de resto, confirmado pelos valores da direcção

Cenário 2 – O mesmo do Cenário 1 para as 0 horas do dia 13/07/2001.

WAM
San Nicolas Island - 2001/07/13, 0h00



	H _s (m)	T _e (s)	T _z (s)	T _p (s)	P (kW/m)
modelo	2.09	11.6	8.0	18.0	25.0
bóia	2.14	6.6	5.0	6.3	14.9

	Direcção (°)								
	Média 0.025 ≤ f ≤ 0.58	V	E _{rms}	Altas frequências 0.125 ≤ f ≤ 0.58	V	E _{rms}	Baixas frequências 0.025 ≤ f < 0.125	V	E _{rms}
modelo	228.4	-10.7	21.0	304.2	-10.8	11.8	206.4	-10.6	29.6
bóia	308.6			316.0			223.4		

média global - o elevado desvio observado está mais relacionado com erros na estima da densidade espectral do que com erros na estimativa direccional. O cálculo dos erros, que envolve a densidade espectral média e não as densidades espectrais do modelo e da bóia,

traduz este desvio de forma qualitativa mas não de forma quantitativa. Nos meses de Verão no Hemisfério Norte, em que ocorreram vários estados de mar semelhantes ao ilustrado neste exemplo, verificou-se uma tendência de sobrestima, por parte do modelo WAM, de ondulação com proveniência aproximada de Sudoeste.

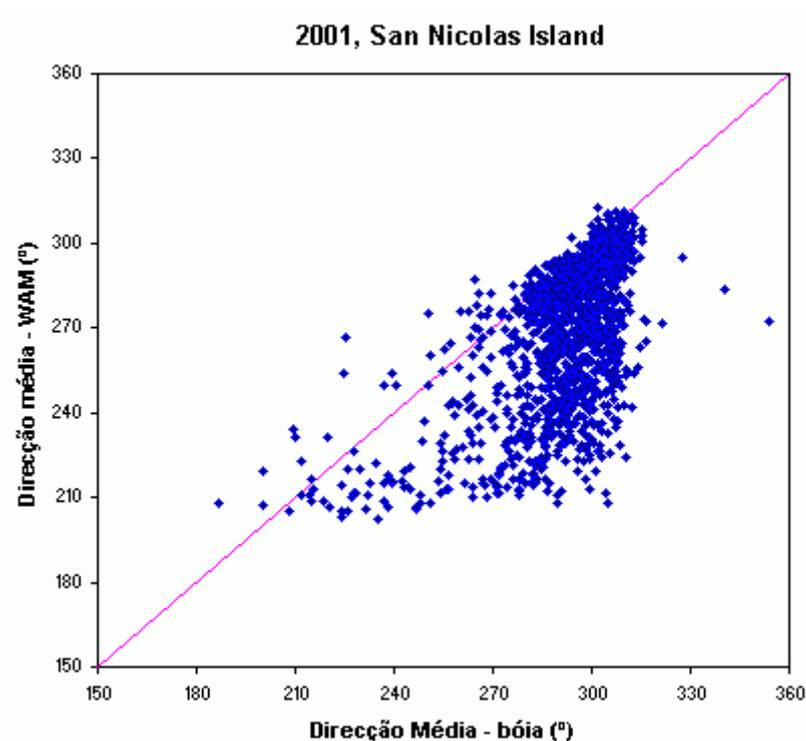


Fig. 1 – Diagrama de dispersão da direcção média global para a Ilha de San Nicolas, ano 2001.

O diagrama de dispersão representado na Fig. 1 mostra um desvio da direcção média global calculada pelo WAM em relação à direcção média global medida pela bóia (a linha rosa representa a recta $x = y$). Os dados referem-se ao ano completo de 2001. A grande maioria das direcções medidas são do quadrante Norte – Oeste (entre 270° e 310°). As estimativas do WAM acompanham grande parte destas medições. Observa-se, no entanto, um conjunto de pontos correspondentes a direcções medidas provenientes do quadrante Norte – Oeste e direcções calculadas provenientes do quadrante Sul – Oeste (entre 210° e 250°).

Esta tendência observa-se, de igual modo, na Fig. 2, que representa o diagrama de dispersão da direcção média para as baixas frequências, para o mesmo período.

No entanto, o diagrama de dispersão da direcção média para as altas frequências (Fig. 3) já não revela de forma tão evidente esta tendência, significando isto que o erro se verifica, principalmente, na estimativa de componentes correspondentes à zona do espectro de baixas frequências, isto é, o erro deverá ocorrer na estimativa de regimes de ondulação. O Quadro 1 apresenta valores médios dos parâmetros de qualidade calculados para o ano completo de 2001. Note-se que existe, de facto, um maior erro na estima da direcção média para as baixas frequências, responsável pelo elevado erro observado na direcção média calculada para o espectro completo.

O histograma anual do viés e do erro médio quadrático da direcção média global (Fig. 4) mostra a ocorrência de maiores erros da estimativa pelo WAM nos meses de Verão, em particular no mês de Julho. De facto, o padrão já observado no diagrama de dispersão da direcção média global referente ao ano completo observa-se de uma forma demarcada no diagrama de dispersão referente ao mês de Julho (Fig. 5). Nos meses de Inverno do Hemisfério Norte, em que geralmente ocorrem as maiores tempestades, que originam regimes

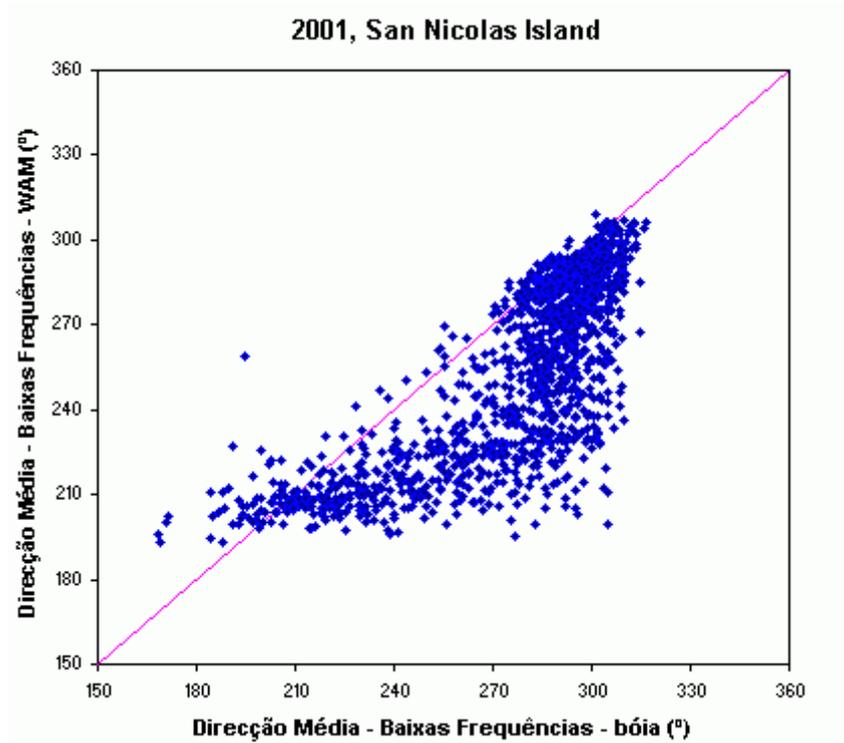


Fig. 2 – Diagrama de dispersão da direcção média para as baixas frequências, para a Ilha de San Nicolas, ano 2001.

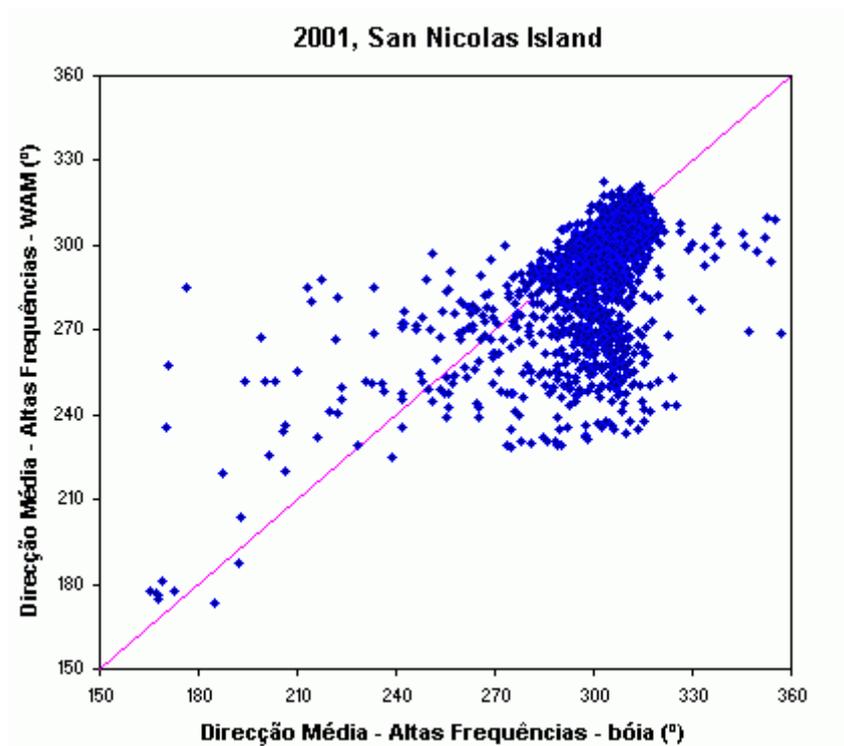


Fig. 3 – Diagrama de dispersão da direcção média para as altas frequências, para a Ilha de San Nicolas, ano 2001.

Quadro 1 – Qualidade das estimativas da direcção média calculada pelo modelo WAM para a Ilha de San Nicolas, em 2001.

Direcção Média	V (°)	E_{rms} (°)
Global	-12.4	28.3
Baixas Frequências	-15.8	32.8
Altas Frequências	-9.9	25.9

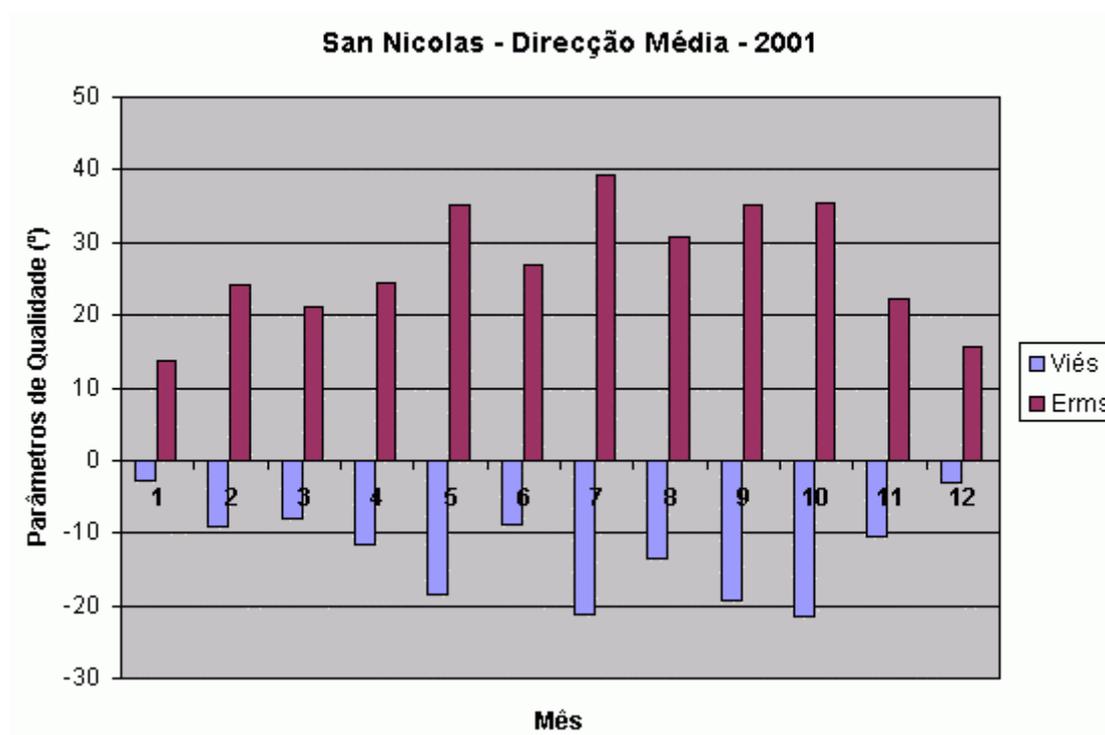


Fig. 4 – Histograma anual das estatísticas referentes à direcção média global, para a Ilha de San Nicolas, ano 2001.

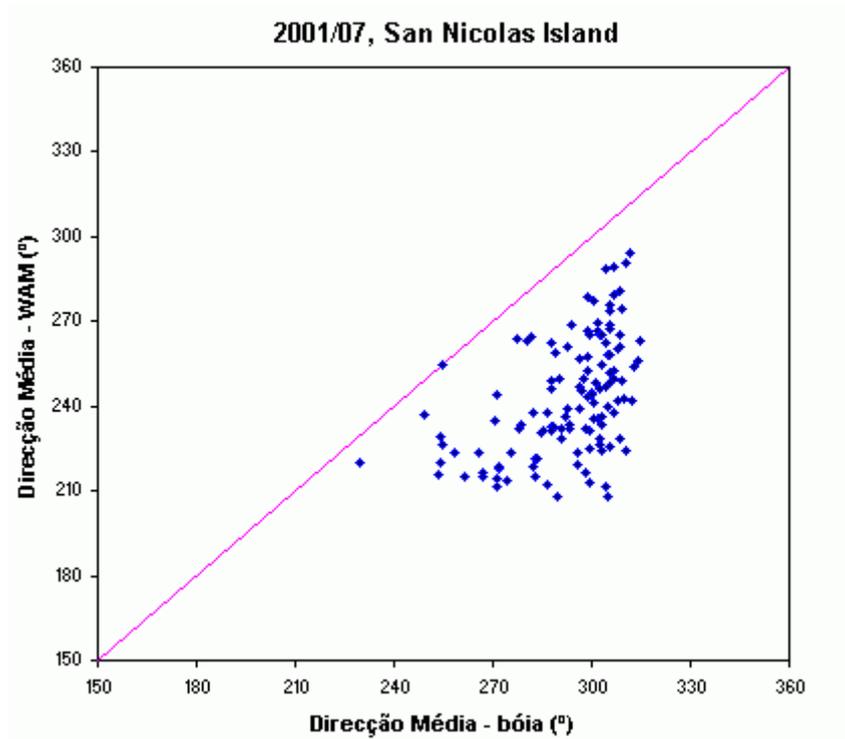


Fig. 5 – Diagrama de dispersão da direcção média, para a Ilha de San Nicolas, Julho de 2001.

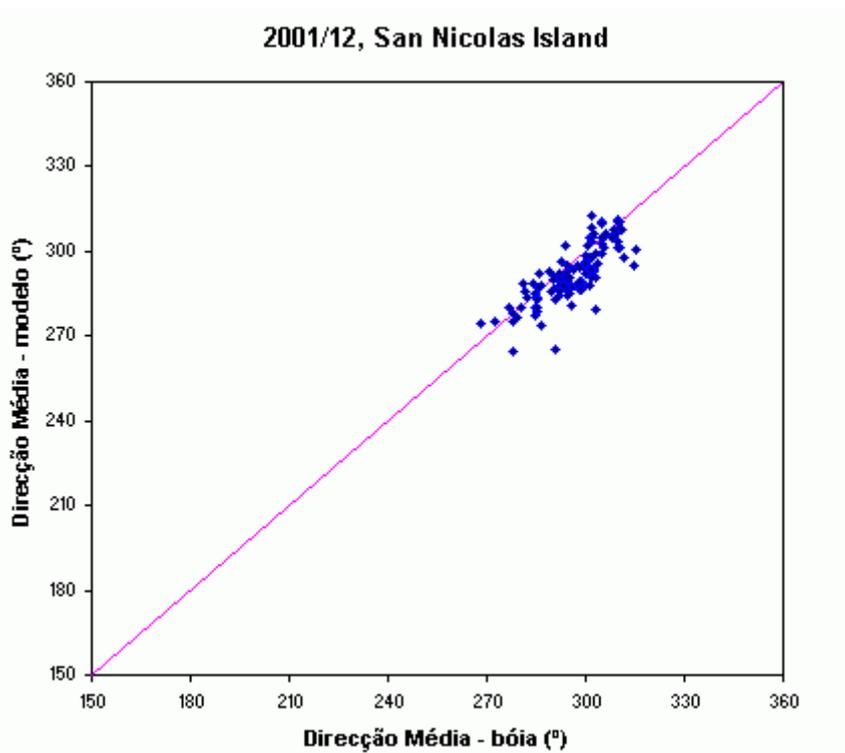


Fig. 6 – Diagrama de dispersão da direcção média, para a Ilha de San Nicolas, Dezembro de 2001.

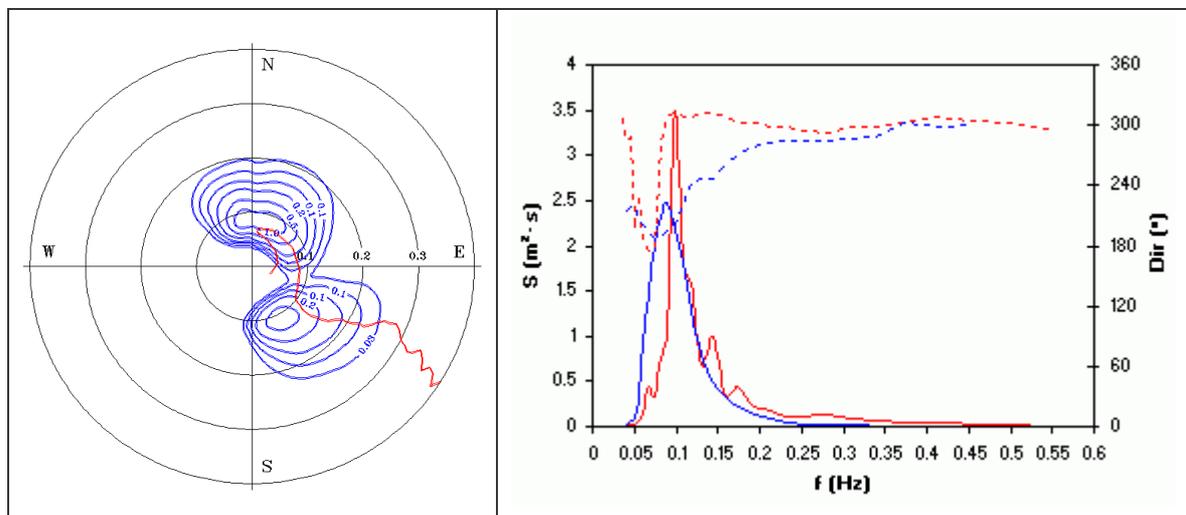
de ondulação com proveniência (na Ilha de San Nicolas) de Oeste, a estimativa direccional do modelo tem uma maior precisão. No mês de Dezembro, por exemplo, as estimativas do modelo WAM para a direcção média global têm uma elevada precisão (Fig. 6). Nos meses de Verão, nesta região da costa Oeste dos EUA, verifica-se a presença de regimes de ondulação provenientes do Hemisfério Sul, originados por tempestades junto à Nova Zelândia e em zonas mais próximas da América do Sul (O'Reilly *et al.*, 2001). A situação apresentada no Cenário 2 ilustra bem este fenómeno. Trata-se, na realidade, de um estado de mar referente ao mês de Julho, em que estão presentes dois regimes, um de ondulação proveniente de Sudoeste (cerca de 223°) e outro de vaga com direcção predominante de Noroeste (cerca de 316°). O regime de ondulação é sobrestimado pelo modelo, o que corresponde ao observado nos diagramas de dispersão direccional.

O terceiro exemplo (Cenário 3) representa uma situação muito semelhante à apresentada no Cenário 2. Observa-se um regime proveniente do quadrante Sul – Oeste, localizado na zona de baixas de frequências, e um regime com direcção aproximada de Noroeste. No diagrama da direita os espectros de frequência apresentam um só pico claramente destacado. No entanto, no caso do espectro de frequência da bóia, existe uma notória variação direccional, indicando a presença dos dois regimes distintos. Esta diferenciação não pode ser inferida a partir dos valores da direcção média para as bandas de baixas e altas frequências, uma vez que o critério utilizado (separação em $f = 0.125$ Hz) divide o pico a meio, existindo componentes de elevado conteúdo energético, pertencentes a este pico, que entram no cálculo da direcção média para as baixas frequências. Deste modo os valores da direcção média para as baixas e para as altas frequências da bóia são muito semelhantes, o que confirma que o critério de divisão do espectro em ondulação e vaga não pode ser universal. No caso do modelo a variação direccional não é tão acentuada (diagrama da direita). O espectro encontra-se um pouco mais deslocado para as baixas frequências ($T_p = 11.2$ s), sendo a direcção de pico aproximada de Sudoeste, enquanto a bóia apresentava uma direcção de pico de aproximadamente 305°. De facto, também neste caso o modelo estima os mesmos regimes que a bóia mede, apesar de num caso e noutro serem diferentes os regimes predominantes: o modelo sobrestima a ondulação proveniente de Sudoeste. No diagrama da esquerda é possível observar estes sistemas, bem mais demarcados no caso do modelo em que se nota a presença de componentes dos dois sistemas nas mesmas bandas de frequência (isto só é possível observar na representação do espectro direccional completo).

Os exemplos apresentados referentes ao mês de Julho permitem concluir que os sistemas de ondulação provenientes de Sudoeste são sobrestimados pelo modelo, o que justifica o desvio observado no diagrama de dispersão da direcção média global. Este facto pode ser explicado pela presença de ilhas no Oceano Pacífico que bloqueiam parcialmente a propagação da ondulação e que não estão representadas na malha do modelo WAM.

Cenário 3 – O mesmo do Cenário 1 para as 0 horas do dia 29/07/2001.

WAM
San Nicolas Island - 2001/07/29, 0h00



	H _s (m)	T _e (s)	T _z (s)	T _p (s)	P (kW/m)
modelo	1.58	10.4	8.8	11.2	12.8
bóia	1.56	8.2	6.0	10.0	9.8

	Direcção (°)									
	Média 0.025 ≤ f ≤ 0.58	V	E _{rms}	Altas frequências 0.125 ≤ f ≤ 0.58	V	E _{rms}	Baixas frequências 0.025 ≤ f < 0.125	V	E _{rms}	
modelo	207.7	-66.5	78.6	262.9	-41.1	47.3	199.3	-77.4	88.8	
bóia	304.9			305.2			304.6			

6 Conclusões

A metodologia apresentada revelou-se apropriada para avaliação dos resultados dos modelos numéricos de agitação marítima, em particular no que se refere ao aspecto direccional. O suporte gráfico apresentado permite uma correcta visualização das características e desempenhos dos modelos, em particular o elevado grau de sofisticação, que atingiram no presente, na reprodução das características dos estados de mar e identificação de diferentes regimes de agitação.

Os modelos numéricos de agitação marítima têm tido uma utilização crescente na caracterização dos climas de ondas, quer para integração em atlas completos ou para avaliação pontual de locais para diversos propósitos. Os seus resultados apresentam uma boa fiabilidade, sendo, no entanto, necessário ter em consideração as características geomorfológicas particulares de cada local, uma vez que estas podem condicionar de forma visível a qualidade desses resultados.

Apesar de pouco utilizado, o espectro direccional é o mais completo descritor singular da agitação marítima, reunindo um elevado conteúdo de informação relativa ao estado de mar. Só através do espectro direccional se torna possível identificar componentes espectrais de igual frequência mas com diferente proveniência. A utilização exclusiva do espectro de frequência e de parâmetros direccionais médios não é suficiente para caracterizar de forma completa as características direccionais e energéticas do estado de mar. Por representar uma contribuição no estabelecimento de uma forma de análise da totalidade da informação contida no espectro direccional, a presente metodologia poderá constituir um significativo contributo para a crescente utilização do espectro direccional, particularmente em aplicações de engenharia.

Referências

- Goda, Y., 1985: Random Seas and Design of Marine Structures. University of Tokyo Press, New York, Japan. 323 pp.
- Gonçalves, A.M., Moreira, N. e Pontes, M.T., 2002: Utilização de Dados de Satélite na Avaliação do Recurso Energético das Ondas do Mar. *Actas do XI Congresso Ibérico e VI Congresso Ibero-Americano de Energia Solar. Vilamoura. 29 de Setembro a 2 de Outubro.*
- Instituto Hidrográfico, 1994: Dados Direccionais de Agitação Marítima na Costa Portuguesa, NATO PO-WAVES, SUB-PROJECTO A, Relatório Final da Tarefa A1-5. REL.TF.OM 4/94. Dezembro.
- Oliveira Pires, H., 1993: Modelação Numérica das Ondas Geradas pelo Vento. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica. Instituto Superior Técnico. 222 pp. Outubro.
- O'Reilly, W.C., R.T. Guza, R.J. Seymour: Wave Prediction In The Santa Barbara Channel. MMS OCS Study 2001-055. Coastal Research Center, Marine Science Institute, University of California, Santa Barbara, California. MMS Cooperative Agreement Number 14-35-0001-30758. 8 pp.
- Pontes, M.T., 1998a: Assessing The European Wave Energy Resource. *Transactions of ASME. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 120, pp 226-231.
- Pontes, M.T., 1998b: Caracterização Energética das Ondas Marítimas e Estudo dos Problemas de Refracção no seu Aproveitamento. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica. Instituto Superior Técnico. 389 pp. Junho.
- Sarpkaya, T. e Isaacson, M., 1981: Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures. Van Nostrand Reinhold Company, New York, U.S.A.. 651 pp.
- The WAMDI Group, 1988: The WAM Model - A Third Generation Wave Prediction Model. *J. Phys. Ocean.*, vol. 18, pp 1775-1810.
- Wells, N., 1997: The Atmosphere and Ocean: A Physical Introduction – 2nd Edition. John Wiley & Sons Ltd, England.