



Espectro de Energia das Ondas na Bacia de Campos

Ney A. B. Seixas, MCT/Observatório Nacional/Coordenação de Geofísica

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The main goal of this paper is to show how the ocean waves energy is distributed as a function of frequency. For this purpose, the data set was obtained using an oceanographic buoy, type pitch and roll, operated by Petrobras, from 1991 to 1995, in deep waters (1000 m) at both Marlim and Barracuda fields of Campos Basin, South-East Brazil. Data was analysed applying the classical Fourier analysis. The results indicate a predominancy of spectra with two or more random frequency components. Previous studies have suggested a much simpler wave pattern. The present results can be used in different engineering areas, with well-documented oceanic, naval and coastal applications. Furthermore, it can be applied to studies of natural environment impacts as well as modelling of wave propagation.

Introdução

As ondas que se propagam nos oceanos possuem relação com os processos físicos que as originaram. As estudadas neste trabalho, denominadas ondas superficiais de gravidade geradas pelo vento, têm, conforme seu nome indica, o vento como fonte geradora. Ele atua na interface atmosfera-oceano, transferindo energia do primeiro meio para o segundo e resultando no movimento irregular da superfície denominado agitação marítima. A gravidade atua como força restauradora da condição de equilíbrio da superfície. A propagação destas ondas é dependente da frequência "f" e obedece à equação de dispersão:

$$(2\pi f)^2 = gk \tanh(kh) \quad (1)$$

onde "g" é a constante gravitacional, "k" o número de onda e "h" a profundidade local. Um aspecto peculiar da equação (1) é o número de onda "k", que aparece duas vezes à direita da igualdade. Portanto, ela é uma equação transcendental, possuindo solução apenas por aproximação, em função da profundidade "h" e do comprimento de onda "λ". Para águas profundas ($h \gg \lambda$), ela fica reduzida à:

$$\omega^2 = gk \quad (2)$$

sendo $\omega = 2\pi f$.

Instrumentação

O movimento da bóia é resultante de excitações externas recebidas do mar. Internamente, ela possui dispositivos que transformam a resposta instrumental em grandezas relacionadas às ondas: a elevação da superfície (η) e duas inclinações ortogonais (η_x e η_y). Logo, são três séries temporais ortogonais, amostradas com uma taxa de 1Hz ($\Delta t = 1s$) e registradas durante 20 minutos a cada 3 horas.

A Densidade Espectral Direcional S(f,θ)

A densidade espectral direcional é uma abordagem matemática elaborada para estudar a agitação marítima nos domínios da frequência e do espaço, sendo "f" a frequência e "θ" a direção da onda. Ela foi proposta por Longuet-Higgins et al. (1963) como uma expansão em série de Fourier na forma:

$$S(f, \theta) = \frac{a_0(f)}{2} + \sum_{n=1}^2 [a_n(f) \cos(n\theta) + b_n(f) \sin(n\theta)] \quad (3)$$

A análise espectral efetuada com as 3 séries permite obter espectros cruzados:

$$S_{jk}(f) = C_{jk}(f) + iQ_{jk}(f) \quad (4)$$

onde $C_{jk}(f)$ e $Q_{jk}(f)$ são, respectivamente, as partes real e imaginária de $S_{jk}(f)$ e $j, k = 1, 2, 3$. Mediante um desenvolvimento matemático com os espectros das séries temporais, chega-se a uma forma mais simples de representar a densidade espectral direcional:

$$S(f, \theta) = S(f)D_r(\theta) \quad (5)$$

onde:

$S(f) = C_{11}(f) \Rightarrow$ densidade espectral de potência da elevação da superfície.

$D_r(\theta) \Rightarrow$ espalhamento angular da onda ("spreading").

O presente estudo lidará apenas questões relacionadas à $S(f)$. O spreading será detalhadamente focado em outro (do mesmo autor).

Análise Espectral Aplicada à S(f)

A agitação marítima é um processo estocástico resultante da soma de várias componentes ondulatórias com diferentes amplitudes, frequências, direções e fases, que se combinam formando a superfície irregular do oceano, conforme ilustrado na figura 1. O objetivo é identificar as principais componentes que participam do processo. Neste trabalho buscou-se identificar um máximo de até três componentes.

Quando lida-se com processos estocásticos, é importante

ter sempre claro que não existe a *determinação* de uma grandeza física. O que visa-se obter é seu melhor *estimador*. Isto envolve questões como resolução espectral, tendência, variância e consistência do mesmo, além da técnica de análise utilizada. No caso de $S(f)$, a abordagem clássica de Fourier descrita a seguir é perfeitamente aplicável. Contudo, isto não ocorre com o spreading, como será demonstrado em outro trabalho do mesmo autor.

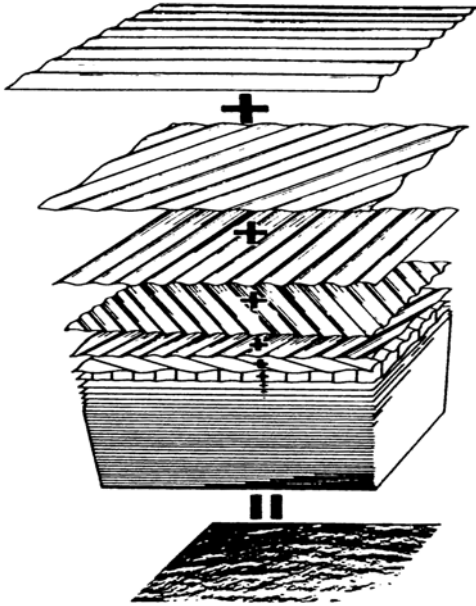


Figura 1: Processo formação da agitação marítima.

A Abordagem Clássica de Fourier

Esta metodologia, também conhecida na literatura como técnica de Welch (Marple, 1987), tem como objetivo obter o estimador com as menores tendências e variâncias possíveis e maior consistência. Para atingir este meta suas 3 etapas podem ser resumidas da seguinte forma: segmentação do registro original em “n” partes iguais, utilização de uma janela espectral e aplicação de um percentual de sobreposição (overlap) em cada uma das “n” partes. A figura 2 resume o procedimento:

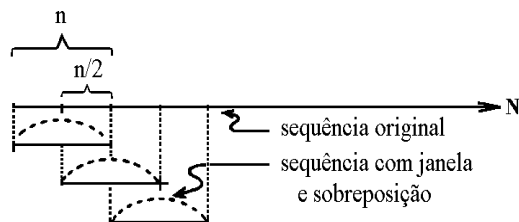


Figura 2: Técnica de Welch: segmentação, janela e sobreposição.

Após vários testes, foram adotados:

- segmentos com 64 segundos de duração.
- janela de Hamming.

- 50% de sobreposição (overlap).

Um importante detalhe desta metodologia consiste em que cada etapa requer a introdução de fatores de normalização, para que a energia total do espectro seja preservada. No domínio da frequência, as alturas das ondas são estimadas com base no momento espectral de ordem zero (m_0), definido pela relação:

$$m_0 = \int_0^{F_n} (2\pi f) S(f) df \quad (6)$$

Sem a normalização de $S(f)$, os resultados das alturas estarão errados. Em (6), F_n é a frequência de Nyquist.

Formulações Espectrais

São expressões analíticas para modelar o espectro de $S(f)$. Existem várias propostas de formulação na literatura do assunto. Neste trabalho foi adotada a denominada JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) para $S(f)$ (Hasselmann et al., 1973). Ela é dada por

$$S(f) = [(\alpha g^2) / ((2\pi)^4 f^5)] \exp[-1.25(f_p/f)^4] \times \exp \left[-\frac{(f - f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right] \quad (7)$$

onde f_p é a frequência de pico, σ um parâmetro fixo, α o fator de escala e γ o fator de forma, com α e γ a determinar. Inicialmente ela foi proposta para mares unimodais (os que possuem apenas uma componente de frequência em seu espectro). G. Soares (1984), estendeu-a a mares bimodais. Neste trabalho, dada a rara oportunidade de ter um equipamento operando em mar aberto e onde vários espectros instrumentais revelavam-se trimodais, a extensão à estes casos foi obtida com êxito. Os resultados da modelagem dos espectros instrumentais nas três modalidades serão mostrados mais à frente. Dentre vários aspectos importantes da modelagem, destaca-se o fato de que ela permite conhecer a parcela da energia total do espectro associada à cada componente de frequência f_p , no caso de mares bi ou trimodais.

Os Picos Espectrais

Apenas os picos de um espectro estão relacionados à processos físicos de interesse. Diante da diversidade de mares, tornou-se fundamental estabelecer critérios para sua seleção e classificação, resumidos a seguir:

- energia do pico.**
O chamado “pico dominante (ou pico 1)”, é o que possui maior amplitude. Os demais são classificados decrescentemente.
- separação mínima em frequência entre os picos.**
Mais de 90% das ocorrências de toda a campanha está concentrada num intervalo de 0.15Hz. Após vários testes, a separação mínima foi estabelecida em 0.03Hz, dando origem à 8 bandas espectrais. Esta divisão deve-se ao intervalo de confiabilidade de medição do instrumento, situado em $0.04 < f_p <$

0.28 Hz.

c) frequências de pico.

Alguns espectros apresentam mais de 3 picos (que é o número máximo admitido), distribuídos nas regiões de baixa, média ou alta frequência. Em tais casos é dada prioridade para ser classificado como "pico 2" ou "pico 3" os da baixa frequência ($f < 0.1$ Hz), mesmo possuindo amplitude inferior aos demais. A adoção deste critério para as ondas de período longo (cuja zona geração encontra-se muito distante do local de medição) deve-se à importância que elas possuem como processo físico, além das implicações práticas. Tais aspectos serão mais discutidos nas conclusões.

d) direção das ondas.

Nas ocorrências bi ou trimodais, as ondas devem possuir direções de origem distintas. A direção " θ " é deduzida das equações (3) e (4) e calculada pela equação:

$$\theta(f) = \arctan\left(\frac{b_1(f)}{a_1(f)}\right) = \arctan\left(\frac{Q_{13}(f)}{Q_{12}(f)}\right) \quad (8)$$

Ela indica o rumo da onda. Contudo, o que deseja-se saber é sua direção de origem e num referencial azimutal. Tal direção, denominada " $\alpha(f)$ " é dada por:

$$\alpha(f) = 90^\circ - (\theta(f) - 180^\circ) = 270^\circ - \theta(f) \quad (9)$$

Finalmente, deve-se subtrair de " $\alpha(f)$ " a declinação magnética local (22.3° na região).

Resultados

As figuras (3), (4) e (5) exemplificam parte do clima de ondas na Baía de Campos, em função das modalidades do mar, alturas significativas das ondas (espectro completo) e direções dominantes ("pico 1"). Os principais resultados deste trabalho são os espectros de energia das ondas, obtidos tanto instrumentalmente como através da modelagem. A partir da figura (7) surgem exemplos de mares bi e trimodais com diferentes configurações espectrais. As figuras (7) e (8) mostram espectros bimodais dominados por baixas e altas frequências, respectivamente. As figuras (9), (10) e (11) apresentam espectros trimodais dominados por baixas, médias e altas frequências, respectivamente. Deste modo, é possível imaginar a existência de inúmeras configurações espectrais distintas, onde o pico dominante pode estar em qualquer região do espectro, reforçando a natureza estocástica do processo. Na figura (5) cada octante representa um setor de 45° centrado nos pontos cardeais, com $\pm 22.5^\circ$ de abertura para cada lado. Logo, o octante 1 é Norte, 2 Nordeste, 3 Leste, 4 Sudeste, 5 Sul, 6 Sudoeste, 7 Oeste e 8 Noroeste.

Com os resultados das figuras 3 e 5, tem-se uma importante informação, comprovada somente após a conclusão deste trabalho: o padrão do mar na Baía de Campos, formado predominantemente por ondas cuja zona de geração encontra-se bem distante do local de medição, conhecidas na literatura como "swell" (octante 5) e ondas com zona de geração muito mais próximas, se

comparadas com as primeiras, pertencentes ao octante 2 e denominadas "mar local" (ou "sea").

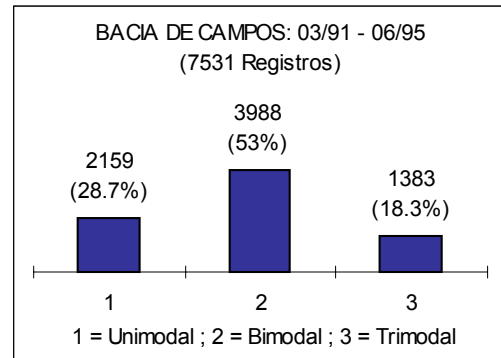


Figura 3: Modalidades do mar.

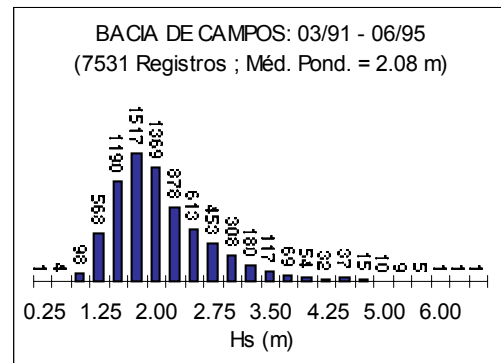


Figura 4: Alturas significativas e sua média ponderada.

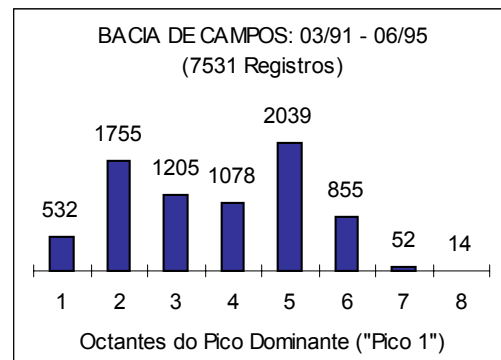


Figura 5: Octantes.

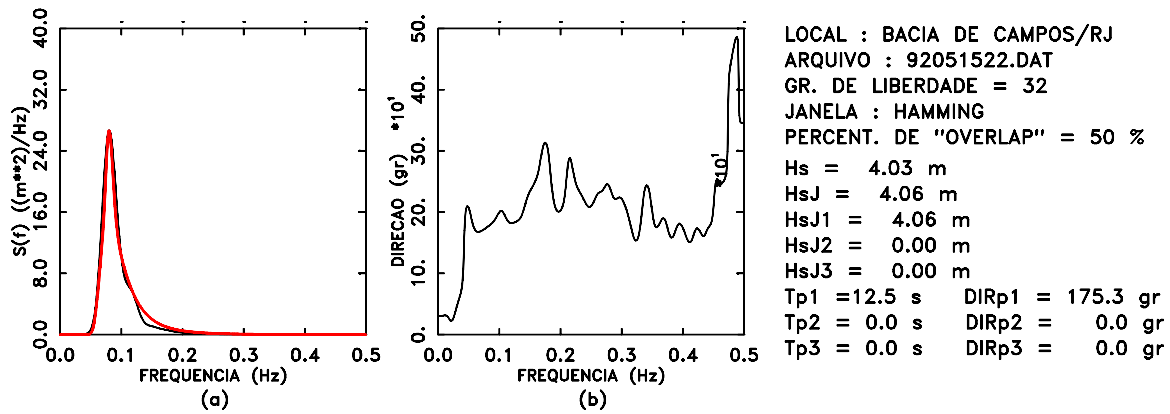


Figura 6: Espectro unimodal com f_p na baixa frequência.

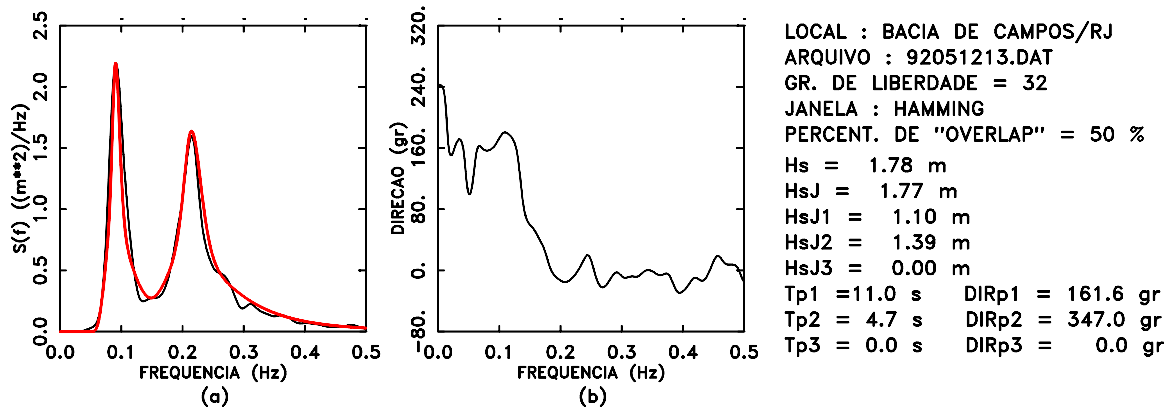


Figura 7: Espectro bimodal com pico dominante na baixa frequência.

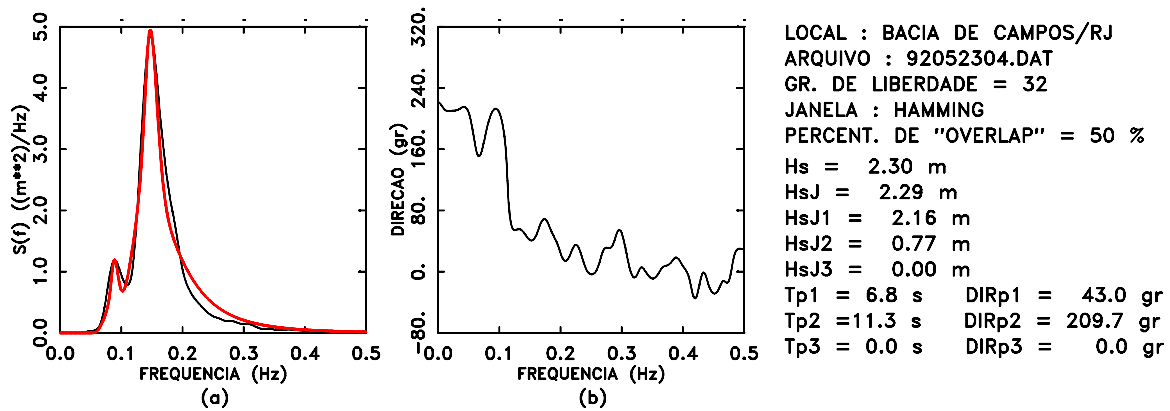


Figura 8: Espectro bimodal com pico dominante na alta frequência.

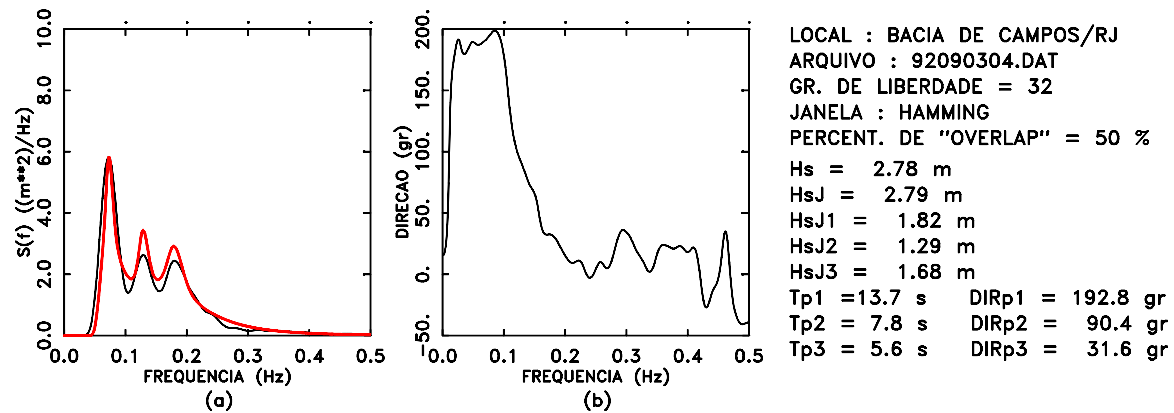


Figura 9: Espectro trimodal com pico dominante na baixa frequência.

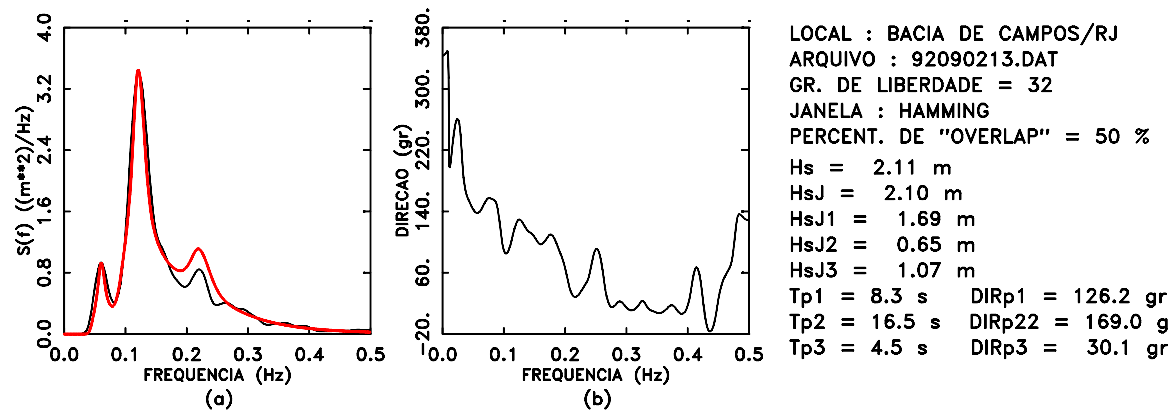


Figura 10: Espectro trimodal com pico dominante na frequência intermediária.

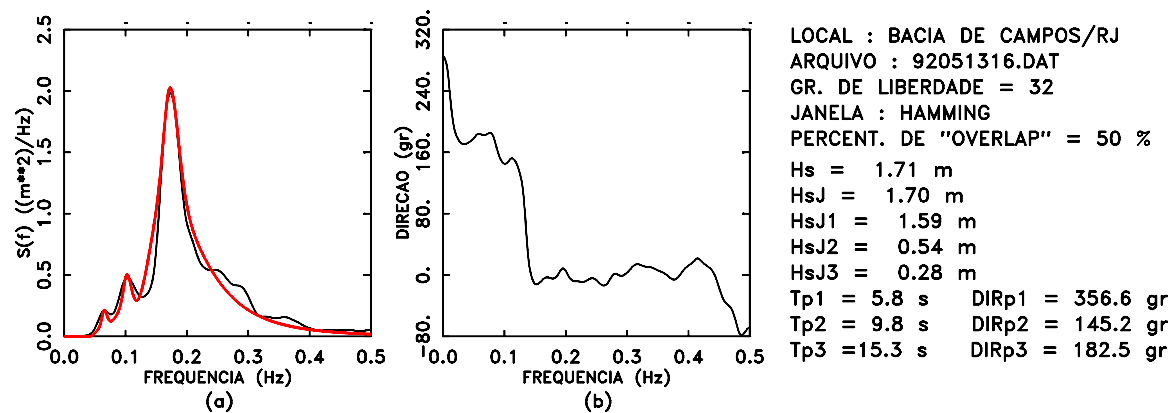


Figura 11: Espectro trimodal com pico dominante na alta frequência.

Conclusões

Alguns comentários complementares são necessários para um melhor entendimento dos resultados, mostrados nas figuras (6) à (11).

Em cada uma delas, a figura (a) apresenta o espectro de $S(f)$, obtido instrumentalmente e através da aplicação do modelo de JONSWAP (linha vermelha). A figura (b) mostra o espectro da direção de origem das ondas (equação (9), já subtraída a declinação magnética local). Ao lado da figura (b) estão as legendas, que identificam cada caso e os principais resultados oriundos da análise espectral.

Inicialmente tem-se o local e o arquivo das séries temporais que foram processadas (η , η_x e η_y). A nomenclatura dos arquivos tem 8 dígitos de identificação: "aammddhh," onde "aa" refere-se ao ano, "mn" ao mês, "dd" ao dia e "hh" à hora.

As 3 linhas seguintes apresentam os procedimentos da análise espectral (mostrados na figura 2 e nos itens a, b e c dela).

Na sequência, tem-se a altura significativa totais das ondas (medidas e modeladas) obtidas dos espectros de $S(f)$ (figura (a)). A nomenclatura "J" é usada como referência ao modelo. Neste ponto há um importante aspecto a ser notado: a comparação entre ambas. Em todos os casos, a diferença é inferior a 2%. Este é o principal indicador da qualidade do ajuste do modelo ao espectro instrumental. Outros indicadores estatísticos poderiam ser aplicados, mas a coerência dos resultados dispensa seu uso. Basta, como complemento, uma simples inspeção visual. Continuando, tem-se a altura significativa associada a cada pico espectral, com seus respectivos índices. Utilizando a indexação, tem-se os períodos de pico ("Tp") e as respectivas direções ("DIRp").

Concluindo, há ainda alguns aspectos interessantes que devem ser notados. Primeiramente, conforme já comentado, os picos espectrais são identificados por sua ordenada e classificados em ordem decrescente. Na figura (7a), por exemplo, nota-se claramente que o "pico dominante" do espectro possui " f_p " com ordenada maior que a do outro ("pico 2"). Assim, surgiu a denominação espectro bimodal dominado por baixa frequência. Contudo, após sua modelagem, tem-se que a parcela de energia associada ao segundo pico é maior que a associada ao primeiro. Tal constatação é, obviamente, baseada nas alturas significativas parciais. Ela só é possível devido à modelagem do espectro de $S(f)$. Entretanto, a classificação está correta e será mantida. Casos deste tipo são nuances de um problema complexo, que só um estudo detalhado permite constatar. Outra situação relevante surge na figura (11). Tem-se um espectro trimodal, com picos nos octantes 1, 3 e 5. É uma onda com altura significativa de 1.71m. O pico dominante possui altura de 1.59m e período de 5.8s. O "pico 3" tem 0.28m de altura e 15.3s de período. Esta é uma típica e importante situação que ocorre bastante na Baía de Campos: um mar local dominando fortemente a situação, juntamente com outros dois. O terceiro, devido às suas características (período, direção e altura) é conhecido na literatura como "swell". "Swell" é uma onda cuja zona de geração encontra-se a centenas (ou milhares) de quilômetros do local de medição. Ela continua sua propagação até se dissipar no oceano ou

atingir o litoral. No segundo caso há importantes consequências. A mais comum é: na medida em que se aproxima e começa a "sentir" o fundo oceânico, ocorre mudança em sua trajetória (refração). Além disto, tende a aumentar expressivamente sua altura até atingir a zona de arrebentação, quase sempre como uma grande onda. Os efeitos decorrentes são imprevisíveis (algumas vezes destrutivos). Daí sua importância, que é objeto de estudo da engenharia costeira e de pesquisas sobre impactos ambientais naturais.

Bibliografia (na ordem de citação no texto)

- Longuet-Higgins, S., Cartwright, D. E. and Smith, N. ; Observation of the Directional Wave Spectrum of Sea Waves Using the Motion of Floating Buoy ; Ocean Wave Spectra ; 1963.
- Marple Jr., S. L.; Digital Analysis With Applications; Prentice Hall Signal Processing Series; 1987.
- Hasselmann, K. et al.; Measurements of Wind-Wave Growth and the Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP); Duet. Hydrog. Zeit. ; Reich A12, 95pp ; 1973.
- Soares, G.; Representation of Double-Peaked Sea Wave; Ocean Engng. , Vol. 11, No. 2, pp 185-207 ; 1984.

Agradecimentos

A Petrobras, que disponibilizou os dados para realização de minha tese de doutorado (além dos demais trabalhos que a sucederam).

Aos colegas do Observatório Nacional, Dr. Luiz M. Barreto, Dr. Jorge L. Souza, Constantino M. Mota e Aluizio A. Cruz, que de diferentes formas, contribuíram na elaboração deste trabalho.