



DISTRIBUIÇÃO DIRECCIONAL NOS COMPONENTES DE ESTADOS DO MAR COMBINADOS

Cláudia Lucas e C. Guedes Soares

Centro de Engenharia e Tecnologia Naval (CENTEC),
Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal

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

Resumo

Estuda-se a dispersão angular da energia das ondas em cada um dos dois sistemas de ondas que compõem os sistemas de estados do mar combinados que se representam por espectros de dois picos. O estudo baseia-se em dados medidos por uma boia ondógrafo à entrada do Porto de Sines. A identificação e separação dos dois componentes espectrais é feita com um método que tem em conta não só a distribuição da energia em frequência mas também em direcção. Esta separação dos sistemas de ondas permite ficar com o espectro direccional de cada um e assim é possível caracterizar a dispersão angular de cada um dos sistemas individuais. Os resultados obtidos demonstram que em regra a dispersão angular não é a mesma nos dois sistemas de ondas.

1 Introdução

A distribuição de energia da agitação marítima associada a um estado do mar pode ser descrita por um espectro em frequência, o qual pode ser estimado a partir de um registo da elevação da superfície num dado ponto. Este tipo de informação é utilizado para estudar o comportamento de navios e de estruturas marítimas e costeiras sujeitas ao efeito das ondas.

Os espectros de vagas foram os primeiros a ser estudados, havendo várias formulações que os descrevem. Após um período com várias propostas de formas espectrais nos anos 50 e 60, os especialistas acordaram que o espectro de Pierson-Moskowitz (Pierson-Moskowitz, 1964) tinha a forma adequada a descrever os espectros de estados do mar completamente desenvolvidos, que representam uma situação de equilíbrio entre o forçamento do vento e as condições das vagas.

Mais tarde foi proposta a formulação de JONSWAP (Hasselmann et al, 1973) que descreve espectros em desenvolvimento, que representam estados não estacionários de crescimento da energia das vagas em resultado do forçamento do vento. Após esta fase de crescimento de energia do espectro sob a acção do vento ele tenderá a tornar-se estacionário ou saturado quando ficar completamente desenvolvido. O espectro de JONSWAP representa uma modificação do espectro de Pierson-Moskowitz e a formulação matemática é tal que se reduz à forma do espectro de Pierson-Moskowitz quando o factor empolador do espectro se reduz ao valor de 1.

Apesar de estas serem as formas que descrevem as vagas de vento, o facto é que em muitas ocasiões a agitação marítima num dado local resulta não só da situação local que provoca um sistema de vagas de vento, mas também de uma ondulação que foi provocada por uma tempestade noutra local e se propaga já sem efeito do vento até ao local em estudo. Muitas vezes basta até haver uma rotação na direcção do vento local para se começar a gerar um novo sistema de ondas que se vai sobrepor ao sistema inicial de vagas.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Estas situações mais complexas necessitam de ser representadas por um espectro que tenha tipicamente um modelo para cada um dos dois sistemas de ondas, o que muitas vezes implica que o espectro de frequência tem o aspecto de dois picos.

Esta situação pode ser representada por uma generalização da formulação do espectro de vagas como foi proposto por Ochi e Hubble (1976) e por Guedes Soares (1984). Enquanto Ochi e Hubble adoptaram espectros do tipo de uma função Gama, que para valores dos expoentes representavam um espectro de Pierson–Moskowitz, e um de JONSWAP, Guedes Soares propôs obter um espectro de dois picos por sobreposição de dois espectros de JONSWAP. Este espectro é representado por quatro parâmetros espectrais, acrescentando aos usuais valores de altura significativa e período característico a razão de energias entre os dois componentes espectrais e o espaçamento entre as respectivas frequências de pico. Portanto, para valores limites destes dois parâmetros adicionais esta formulação do espectro duplo reduz-se à formulação de JONSWAP, podendo pois ser considerado como uma sua generalização.

É de notar que a formulação de Guedes Soares (1984) foi também adoptada por Torsethaugen (1993), que a generalizou pois em vez de adoptar valores médios dos parâmetros de cada espectro JONSWAP, como Guedes Soares (1984), usou estes parâmetros como variáveis a ser ajustadas aos espectros medidos, passando assim o número total de parâmetros espectrais de 4 para 7.

Guedes Soares e Nolasco (1992) ajustaram o modelo espectral de Guedes Soares (1984) a dados da costa portuguesa e determinaram os valores característicos dos parâmetros espectrais para cada classe de espectros caracterizada por uma altura significativa e período médio. Torsethaugen (1993) fez o mesmo para a costa Norueguesa determinando os valores médios dos parâmetros espectrais do seu modelo (em maior número) em dados medidos no Mar da Noruega. Este espectro e a sua parameterização tornou-se um standard no projecto de estruturas offshore no Mar do Norte.

A determinação dos parâmetros espectrais de um conjunto de dados medidos obriga a ajustamentos do modelo teórico aos espectros estimados a partir dos registos de altura de superfície do mar, normalmente obtidos por boias ondógrafo. Há várias estratégias possíveis para ajustar os modelos aos espectros, os quais normalmente representam diferentes compromissos entre simplicidade e tempo de cálculo.

Dado que há diferentes métodos de estimar os espectros a partir dos registos e de os alisar, o método de ajustamento tem de ter em conta essas características. Em particular quando os espectros são pouco alisados terão vários picos que representam simplesmente a variabilidade estatística associada ao processo de estimação, pelo que é necessário poder discernir entre este tipo de picos e os que realmente representam o pico de energia de um estado do mar.

Guedes Soares e Nolasco (1992) descrevem o método adoptado na análise dos espectros e Guedes Soares e Henrique (1998) apresentam uma alternativa que utiliza o período de pico em vez do período médio como factor de ajustamento. Rodriguez e Guedes Soares (1999) apresentam ainda uma outra alternativa que torna mais fácil o processo de automatização da identificação dos espectros.

Entretanto a utilização deste tipo de espectro na indústria tornou-se mais frequente e houve outras propostas de métodos de separação dos espectros individuais.

Wang e Hwang (2001) propuseram uma alternativa baseada no argumento que o declive do espectro acima de uma dada frequência depende essencialmente da vaga de vento. Assim, calculando este parâmetro em função da frequência e determinando o seu máximo, identificam o ponto de separação entre os dois espectros. Nos exemplos que apresentaram mostram no entanto que o ponto de separação obtido por esse método acaba por coincidir com o obtido pelo algoritmo de Guedes Soares (1984).

A evolução da tecnologia de medição passou a disponibilizar com mais frequência informação sobre o espectro direccional e também a generalização de estudos de reconstituição disponibilizam informação dos espectros direccionais em grelhas espaciais a intervalos de tempo relativamente reduzidos. Assim sendo passou a ser possível separar as duas



componentes do espectro utilizando informação direccional em complemento da informação da distribuição em frequência.

O primeiro esforço nesta direcção foi feito por Gerling (1992), e mais tarde generalizado por Hanson e Philips, (2001). O método tem o mesmo tipo de procedimento, começando por identificar os picos do espectro mas agora utilizando todo o espaço de frequência e direcção. Depois o procedimento consiste em associar valores espectrais a cada um dos picos identificados. Este procedimento tem a vantagem de também identificar a origem das tempestades mas tem o inconveniente de necessitar de dados de uma grelha espacial e de necessitar também de dados de vento. Portanto quando só há dados de uma bóia direccional não será possível adoptar este método.

Ewans et al (2006) compararam os métodos de separação de componentes espectrais de Guedes Soares (1984) e de Hanson e Philips, (2001), e embora o último seja mais versátil por permitir tratar estados do mar com mais de dois picos, no caso de espectros de 2 picos o método de Guedes Soares em vários casos resultou em ajustamentos mais precisos.

Boukhanovski e Guedes Soares (2009) generalizaram o procedimento de Guedes Soares (1984) ao espaço multidireccional utilizando um algoritmo eficiente de optimização que permite reduzir o erro de ajustamento do espectro. Assim este método permite identificar o espectro direccional de cada componente da agitação marítima enquanto os métodos anteriores estimavam essencialmente o espectro escalar.

Este trabalho utiliza o algoritmo descrito em Nolasco e Guedes Soares (1992) para separar os dois sistemas de ondas no espectro e depois inclui também informação direccional para analisar as distribuições direccionais de cada um dos componentes do espectro de um conjunto de dados medidos em Sines.

2 Metodologia

A metodologia proposta inicia-se com a separação das duas componentes espectrais, seguida pelo ajuste da distribuição direccional a cada componente. Na figura 1 pode observa-se uma representação esquemática da metodologia proposta.

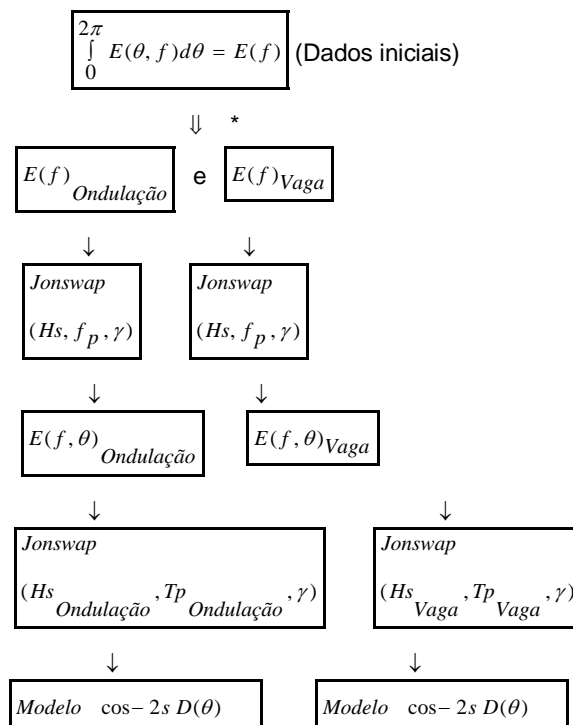


Figura 1. Metodologia proposta.



2.1 Método de separação das componentes espectrais

A partir do espectro direccional $E(\theta, f)$, calcula-se o espectro escalar dos dados iniciais:

$$\int_0^{2\pi} E(\theta, f) d\theta = E(f) \quad (1)$$

O espectro escalar pode conter informação de dois sistemas de ondas. A ondulação, tem ondas de uma forma regular, por se encontrar longe do seu ponto de geração e caracteriza-se por ter frequências baixas e consequentemente períodos altos. As vagas são ondas geradas localmente pelo vento e caracterizadas por possuírem frequências altas e períodos baixos.

Efectuou-se a separação dos dois sistemas de ondas, ondulação e vaga, identificando no espectro dois picos, um correspondente à ondulação e outro à vaga.

O primeiro pico de densidade espectral identificado no espectro escalar é o máximo valor de energia encontrado. Seguidamente foi feita a análise a todos os valores das ordenadas no sentido de se verificar se se tratavam de máximos ou mínimos, aplicando os seguintes critérios: 1) mínimos, são considerados os pontos que apresentem três pontos consecutivos com densidade espectral superior, imediatamente antes e após o ponto considerado, 2) máximos, são considerados os pontos que apresentem três pontos consecutivos com densidade espectral inferior, imediatamente antes e após o ponto considerado, 3) se existirem máximos com densidade espectral superior a 15% da densidade espectral do pico de maior densidade, encontrando deste modo o segundo máximo espectral. Se existir mais de um mínimo entre o primeiro máximo (1^o pico) e o segundo máximo encontrado deve ser seleccionado apenas o ponto mínimo que se encontre mais próximo do máximo (2^o pico).

O ponto mínimo encontrado entre os dois estados do mar identifica a separação destes sistemas. Com frequências menores e períodos mais elevados identifica-se a ondulação e com frequências mais elevadas e períodos menores a vaga. Obtendo o espectro escalar $E(f)$ para os dois sistemas, a cada um dos espectros empíricos foi ajustada a função modificada de Jonswap (Glenn, 1992), dada em termos de três parâmetros – altura significativa, H_s , frequência de pico, f_p , e o factor de intensificação do pico, γ .

$$E(f) = c \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-5} \exp \left(-1.25 \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right) \gamma \exp \left(\frac{-(f - f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right) \quad (2)$$

Com:

$$c = \frac{5H_s^2}{16f_p} \left(1.15 + 0.1688\gamma - \frac{0.925}{(1.909 + \gamma)} \right)^{-1}; \quad (3)$$
$$\begin{cases} \sigma = 0.07 & \text{para } f \leq f_p \\ \sigma = 0.09 & \text{para } f > f_p \end{cases}$$

O ponto mínimo é onde se considera a separação entre os dois estados de mar, ondulação e vaga. Partindo desse ponto ou mais precisamente da frequência correspondente, volta-se aos dados iniciais e faz-se a separação da matriz que inclui a distribuição angular. Desse modo pode identificar-se os espectros direccionais da ondulação e vaga.



2.2 Função de dispersão angular

A energia das ondas, num determinado ponto, tem uma distribuição angular assim como uma distribuição sobre uma determinada gama de frequências. Esta distribuição angular da energia das ondas é a *dispersão direccional*. As representações espectrais que incluem as distribuições em frequência e a dispersão angular da energia de onda têm o nome de *espectro direccional*.

O método usualmente utilizado na obtenção de $E(\theta, f)$ é, através do produto do espectro escalar da elevação da superfície do mar $E(f)$ com a função de dispersão direccional $D(\theta, f)$, tal que:

$$E(\theta, f) = D(\theta, f)E(f) \quad (4)$$

em que $D(\theta, f)$ indica a dispersão da energia em uma dada frequência em torno da direcção principal de propagação. Esta função pode ser considerada uma função de densidade de probabilidade dentro de um intervalo de largura 2π , satisfazendo à condição:

$$\int D(\theta, f)d\theta = 1 \quad (5)$$

A dispersão direccional de energia é uma propriedade fundamental das ondas do mar, sendo o elemento chave no entendimento da sua mecânica, dos processos de geração, propagação e decaimento. Uma vez que as características direccionais do espectro de energia podem ser estimadas por métodos paramétricos, em que modelos probabilísticos são ajustados aos dados através da estimação dos parâmetros de forma, a direcção principal e a dispersão em torno desta, neste estudo aplicou-se o modelo $\cos - 2s$.

A função de dispersão direccional é dada por:

$$D(\theta | s, \theta_{\max}) = \frac{2^{2s-1} \Gamma(s+1) \Gamma(s)}{\pi \Gamma(2s)} \cos^{2s}(\theta - \theta_{\max}), \text{ com } |\theta - \theta_{\max}| < \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

em que s é o factor da função de dispersão; θ_{\max} é a direcção de propagação máxima da onda, e $\Gamma(x)$ é a função Gama.

No cálculo do parâmetro dispersão para a ondulação e para a vaga, o parâmetro s do modelo $\cos-2s$ não deriva directamente da dispersão, é o oposto, e a dispersão deriva do parâmetro s . Neste estudo, o espectro de Jonswap e o modelo simples $\cos-2s$ foi ajustado através do método dos mínimos quadrados a cada espectro direccional de ondulação e de vaga no sentido de obter a função de dispersão média da onda, $D(\theta)$ em cada sistema. Os parâmetros estimados para as duas componentes espectrais foram, o parâmetro de dispersão, parâmetro de intensificação do pico, o parâmetro do modelo $\cos-2s$, a direcção do máximo, o período de pico e a altura significativa.

O parâmetro de dispersão para a ondulação e para a vaga, que neste caso é o desvio padrão σ . Sendo $\sigma^2 = \int (x - \bar{x})^2 f(x) dx$ a variância de uma variável aleatória e um indicador da distância a que se encontra um ponto da amostra em relação á sua media, designou-se a dispersão angular por:

$$\sigma = \sqrt{\int (x - \bar{x})^2 f(x) dx} \quad (7)$$

em que $f(x)$ é a função densidade de probabilidade, e a função $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$. Neste caso, a função de dispersão é:

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} D(\theta) d\theta = 1 \quad (8)$$

pode-se então com o mesmo sentido fazer uso do desvio padrão.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Nas tabelas 1 a 3, o valor para o parâmetro da dispersão é o desvio padrão para o ângulo em redor do máximo e um indicador da dispersão de energia. O parâmetro de intensificação do pico para a ondulação e para a vaga, é designado por γ , tendo como limites o intervalo de 0.8 a 10; s é o parâmetro do modelo cos-2s para a ondulação e para a vaga, tendo como limites o intervalo de 1 a 50; $\theta_{\max,o}$ é a direcção do máximo para a ondulação e $\theta_{\max,v}$ é a direcção do máximo para a vaga. $T_{p,o}$ e $T_{p,v}$ são o período de pico para a ondulação e para a vaga em que $T_p = 1/f_p$. A altura significativa estimada pelo código implementado utiliza a altura significativa de cada uma das componentes.

$$H_{sEstm} = \sqrt{(H_{s,o})^2 + (H_{s,v})^2} \quad [m] \quad (9)$$

Neste estudo procedeu-se ao ajuste do espectro de Jonswap a cada espectro direccionado de ondulação e de vaga e á aplicação do modelo cos-2s com o intuito de estimar a função de dispersão média da onda, $D(\theta)$ de cada sistema. O espectro de Jonswap foi estimado neste estudo através da equação 3 já referida anteriormente.

3 Aplicação do modelo

O modelo descrito no capítulo anterior foi aplicado a dados direccionais de Sines. Em estudo consideraram-se períodos dos anos 2000 a 2006. Os ficheiros espectrais de dois picos foram registados de 3 em 3 horas. Os resultados que se seguem foram obtidos através de código desenvolvido em MATLAB[®].

3.1 Descrição dos dados de Sines

Foram utilizados neste estudo dados direccionais de Sines, referentes a períodos compreendidos entre 2000 e 2006. Os dados foram registados de 3 em 3 horas com início às horas sinópticas, não se encontrando totalmente completos. Consistem em espectros obtidos pelo processamento das três séries temporais, relativamente ao deslocamento vertical da superfície livre e aos deslocamentos horizontais segundo as direcções N-S e E-W, $\eta_1(t)$, $\eta_2(t)$ e $\eta_3(t)$. Foi aplicada aos dados a metodologia já descrita. No capítulo seguinte serão apresentados os gráficos com a identificação do ponto mínimo (ponto onde é feita a separação dos dois estados de mar), os ajustamentos do espectro teórico de Jonswap a cada uma das componentes e a aplicação do modelo teórico cos-2s.

3.1.1 Apresentação dos resultados

Na figura 1 a), apresenta-se o espectro direccionado $E(\theta, f)$ na forma de espectro em frequência a partir do qual é estimado o ponto mínimo de acordo com os critérios estabelecidos em 2.1. Neste estudo foram aplicados apenas três critérios apesar de Guedes Soares e Nolasco (1992) referirem a aplicação de cinco critérios na identificação dos espectros de dois picos, a metodologia apresentada neste estudo demonstra ser eficaz na representação dos picos, de ondulação e de vaga. Para o caso do espectro que se encontra representado na figura 2 b) é visível a presença das duas componentes, a ondulação à esquerda com baixas frequências e períodos elevados, e no lado direito do gráfico a vaga nas altas frequências e períodos baixos, Ewans (2006). Na Figura 2 a) está representado o ajuste do espectro teórico de Jonswap a cada componente, na alínea b, temos a representação do espectro direccionado da ondulação e da vaga.

Apresentam-se de seguida dois exemplos representativos da aplicação da metodologia descrita.

Considerando os dados referentes ao ano de 2000, a cada pico identificado no espectro de energia, foi ajustado o espectro modificado de Jonswap (equação 2) como se pode observar na figura 4 a). Para este exemplo pode concluir-se que o ajuste acompanha bem o espectro inicial. A partir deste ponto foi então possível fazer a separação das duas componentes no espectro direccional usando a frequência.

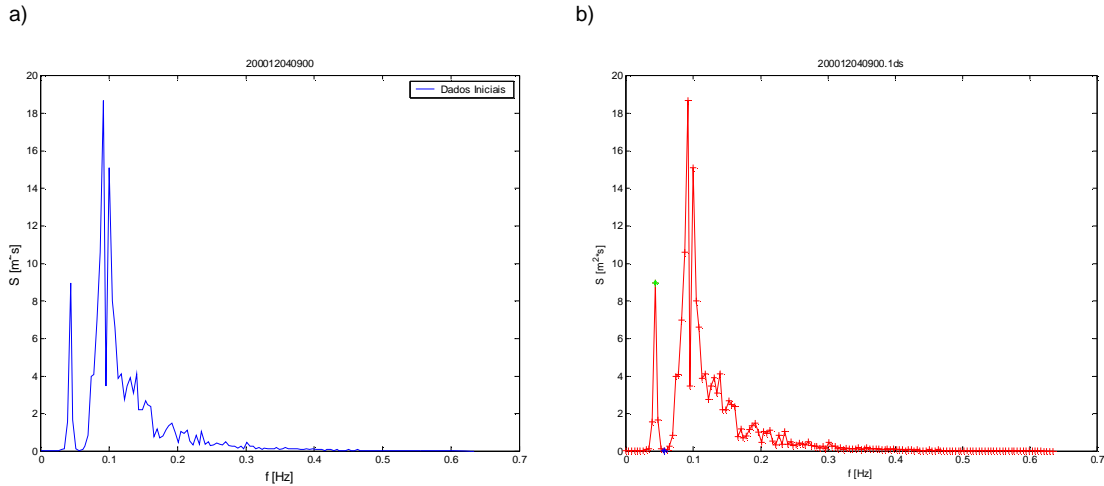


Figura 1 a) e b) – a) Espectro de frequência e b) Espectro em frequência com o ponto de separação a azul e o segundo pico a verde para o espectro de 04 de Dezembro de 2000 às 09h00m.

Na Figura 2 b) pode ver-se o espectro direccionado com as duas componentes representadas. A linha a vermelho indica o ponto na frequência onde o espectro direccionado foi separado nas duas componentes. A ondulação encontra-se nas frequências baixas com uma direcção máxima de 165° (parte inferior do gráfico), a vaga tem uma direcção máxima de 156.9° e encontra-se nas altas – frequências (na parte superior do gráfico).

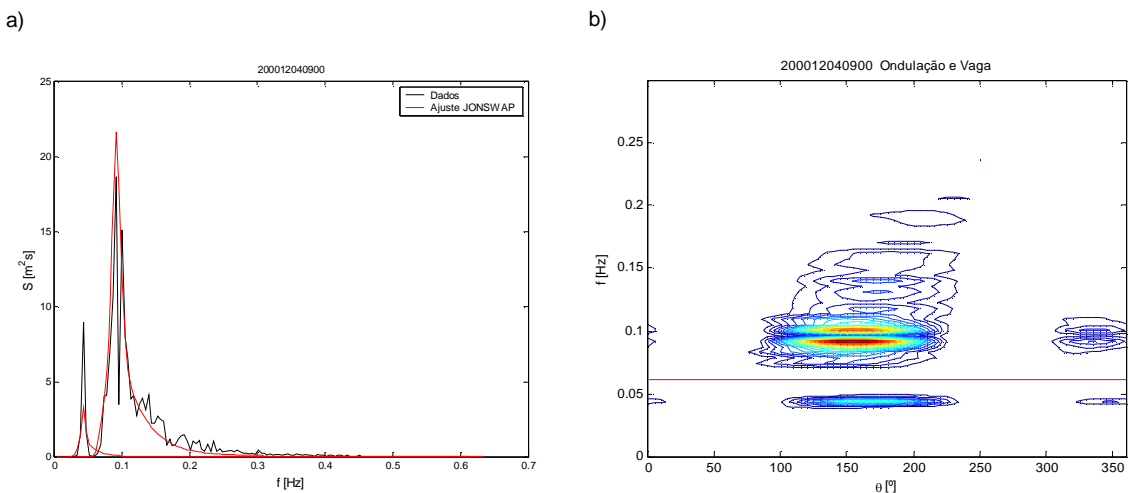


Figura 2 a) e b) – a) Espectro medido com o ajuste de Jonswap e b) Espectro direccionado da ondulação e da vaga.

Nas figuras 3 a) e b) apresentam-se os espectros direccionais das duas componentes com o espectro de Jonswap ajustado a cada uma. A tabela 1 apresenta o resultado da aplicação da metodologia aos espectros, os parâmetros estimados para cada componente.

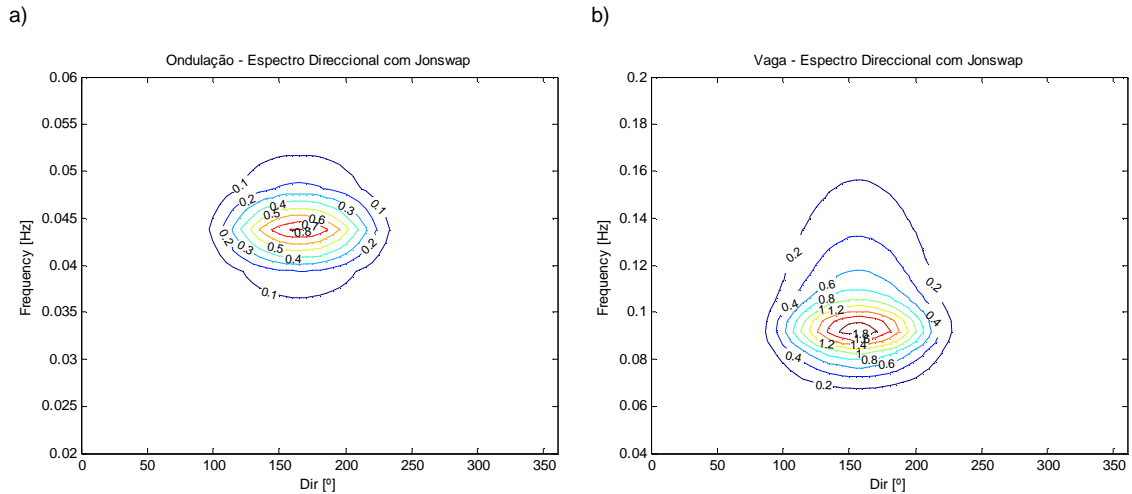


Figura 3 a) e b) – a) Espectro direccional da ondulação e b) Espectro direccional da vaga.

Tabela 1 – Parâmetros estimados pelo modelo para o espectro exemplo 200012040900 (AAAAMDDHHmm).

	Dispersão Angular (°)	γ	s	θ_{max} [°]	T_p [s]	$H_s T$ [m]	$H_s Estm$ [m]
Ondulação	31.8	10	1.1	165.0	23.1	3.59	3.59
Vaga	32.2	2	1.0	156.9	10.8		

A metodologia de separação foi também aplicada aos dados de 2002. Na figura 4 podem ser observados os espectros de frequência inicial e após o processo de separação das componentes. O ponto de separação e o segundo pico podem ser observados na figura 4b.

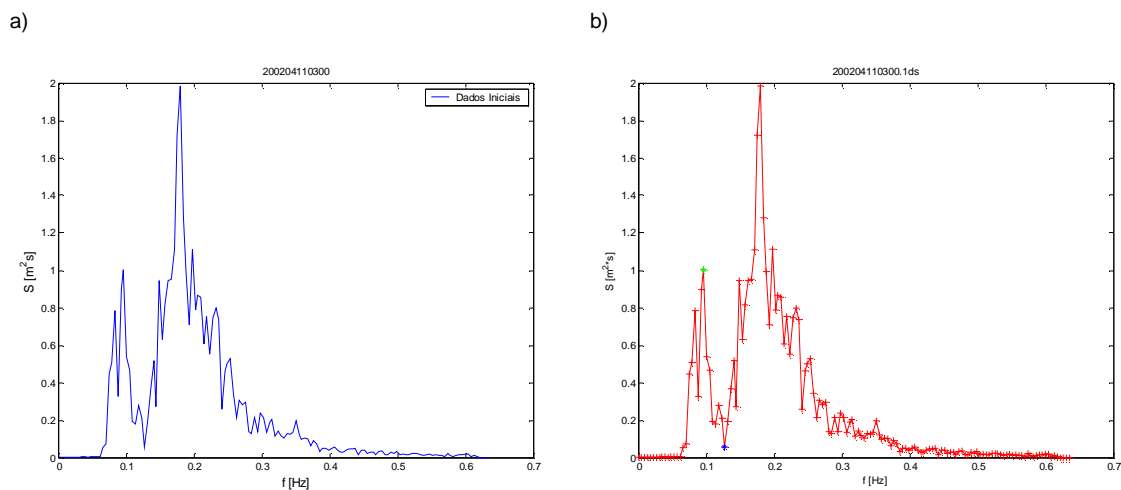


Figura 4 a) e b) – a) Espectro de frequência e b) Espectro em frequência com o ponto de separação a azul e o segundo pico a verde para o espectro de 11 de Abril de 2002 às 03h00m.

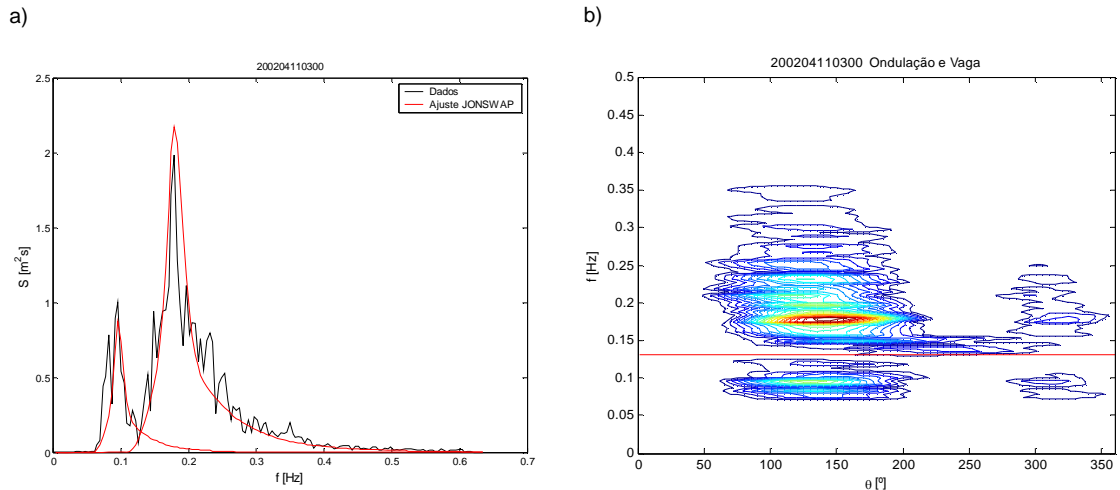


Figura 5 a) e b) – a) Espectro medido com o ajuste de Jonswap e b) Espectro direccional da ondulação e da vaga.

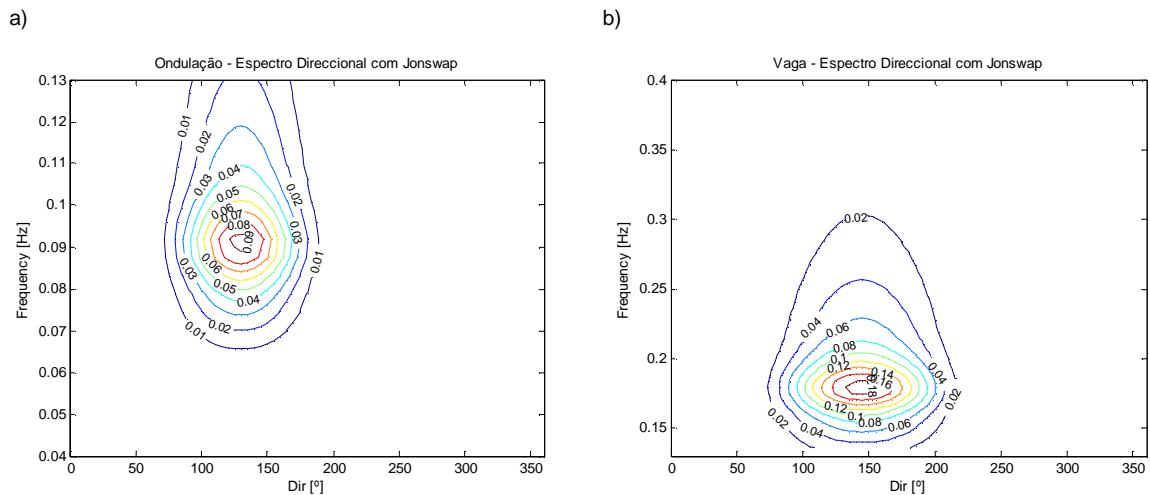


Figura 6 a) e b) – a) Espectro direccional da ondulação e b) Espectro direccional da vaga.

Tabela 2 – Parâmetros estimados pelo modelo para o espectro exemplo 200204110300 (AAAAMMDDHHmm).

	Dispersão Angular (°)	γ	s	θ_{max} [°]	T_p [s]	$H_s T$ [m]	$H_s Estm$ [m]
Ondulação	26.9	1.8	1.7	130.0	11.0	1.68	1.68
Vaga	32.5	2	1.0	144.9	5.6		

Na tabela 3, pode observar-se a relação entre o parâmetro s estimado pelo modelo $\cos-2s$ e a função de dispersão angular para as duas componentes de vários espectros analisados.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Tabela 3 – Parâmetros do modelo cos-2s e parâmetro de dispersão angular para vários espectros.

	Espectro	Ondulação		Vaga	
		s	Dispersão Angular	s	Dispersão Angular
a	200004120900	1.1	31.8	1.0	32.2
b	200104162100	2	25.5	1	32.5
c	200106021800	2	25.5	2	25.5
d	200107030900	2	25.5	1	32.0
e	200109131800	2	25.5	1.2	31.0
f	200211012100	2	25.5	1	32.5
g	200303261800	1.6	27.6	1	32.5
h	200510311200	1	32.3	1	32.5
i	200511181500	2	25.5	1	30.3
j	200604191800	2	25.5	1	32.5
k	200603210600	2	25.5	1	32.5
l	200606250900	2	25.5	1	32.0
m	200607111800	2	25.5	1	30.6

Nas figuras 7 e 8 está representado o comportamento de s , parâmetro do modelo cos-2s e da dispersão angular para cada componente.

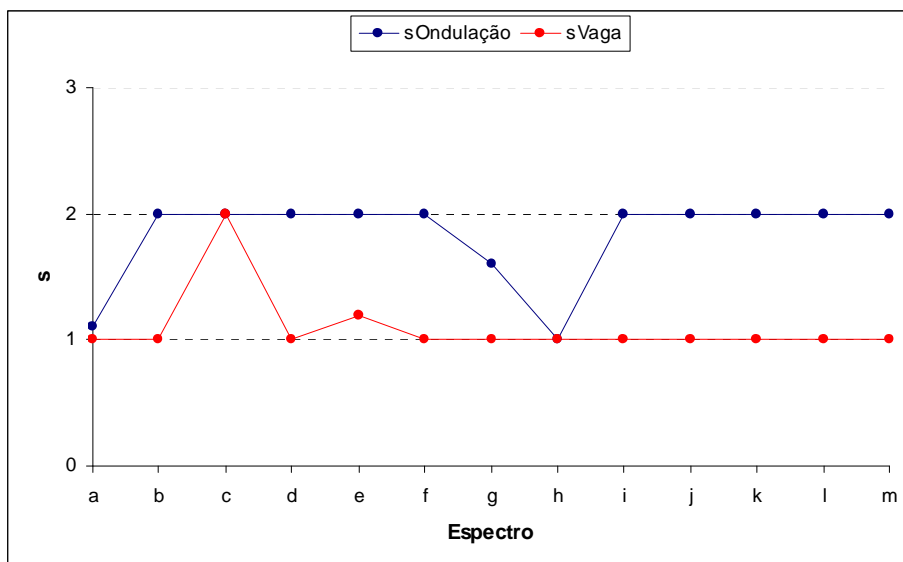


Figura 7 – Comportamento do parâmetro s para a ondulação e para a vaga.

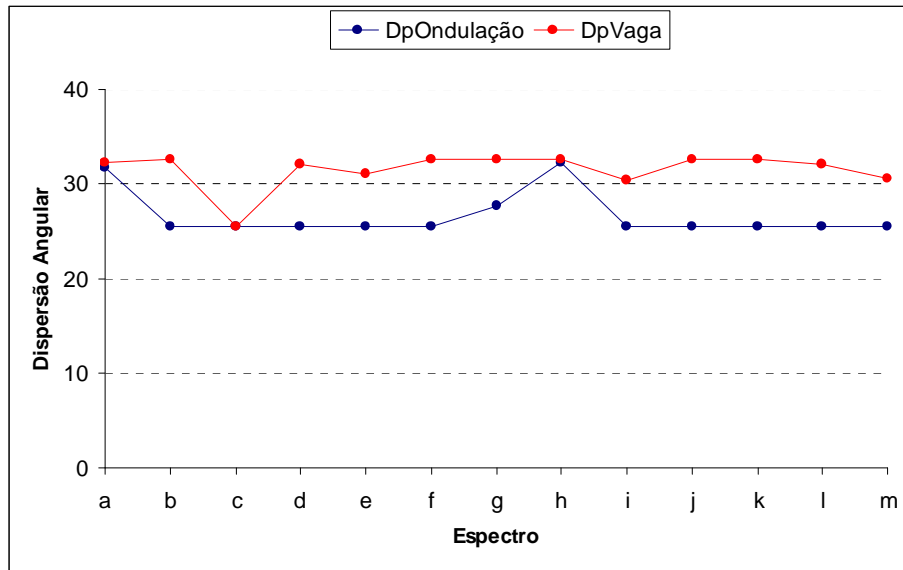


Figura 8 – Comportamento da dispersão angular para a ondulação e para a vaga.

4 Função de dispersão dos espectros de vaga e ondulação

Para avaliar o ajustamento do modelo encontrado foi utilizada uma medida não probabilística, a *distância euclidiana*, que mede a diferença entre o modelo teórico e o modelo estimado.

Neste caso a expressão é definida pela seguinte expressão:

$$D(f) = \sqrt{\sum (D_b(f, \theta) - D_t(\theta))^2} \quad (10)$$

em que $D_b(f, \theta)$ é a função de dispersão do modelo estimado e $D_t(\theta)$ é a função de dispersão do modelo teórico. Este parâmetro mede o erro entre a função de dispersão do modelo teórico e a função de dispersão do modelo estimado, ou seja, a *distância euclidiana* entre a função de dispersão do modelo teórico estimada a partir do modelo $\cos-2s$, $D(\theta)$, e a função de dispersão do modelo estimado $D(f, \theta)$, tendo sido estimada do seguinte modo:

$$\left. \begin{aligned} \int D_b(f, \theta) d\theta &= 1(\text{teórico}) \\ \int D_b(f, \theta) \alpha \times d\theta &= A(\text{bruto para uma frequência}) \end{aligned} \right\} \alpha = A \Rightarrow$$

$$\Rightarrow D_b(f, \theta) = \frac{E(f, \theta)_f}{A_f} \quad (11)$$

sendo $E(f, \theta)_f$ o espectro direccional para cada frequência e A_f a área para cada frequência.

Para uma melhor percepção dos resultados calculou-se também a variância para a ondulação e para a vaga, sendo a variância definida por:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum (x - \bar{x})^2 \quad (12)$$

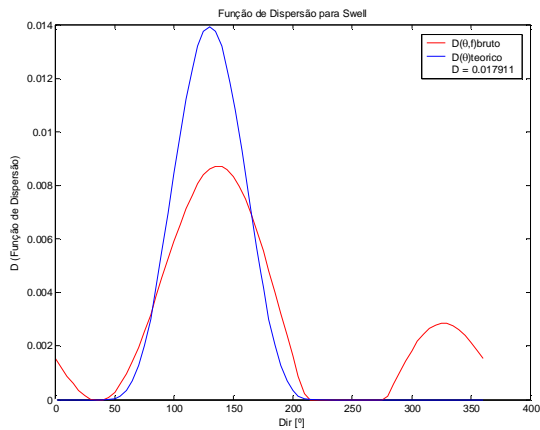
Neste caso tem-se:

$$\sigma = DE / \sqrt{N} \quad (13)$$

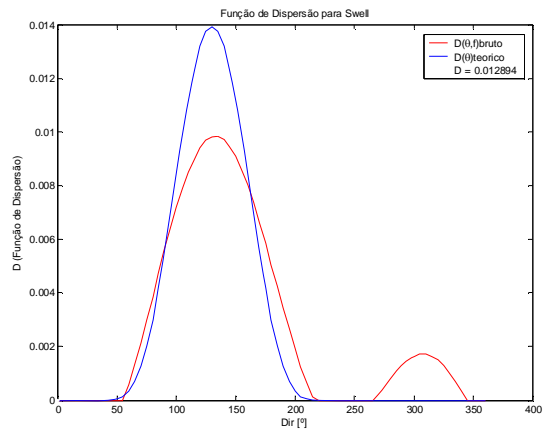
em que, DE é a distância euclidiana encontrada para cada frequência analisada dos espectros de ondulação e de vaga e N o número de direcções sobre o qual o espectro está definido.

Nas figuras 9 e 10 encontram-se representadas para cada frequência as funções de dispersão $D_b(f, \theta)$ e $D_t(\theta)$ e a distância euclidiana existente entre as duas. Foram escolhidas estas frequências uma vez que correspondem ao pico da ondulação e da vaga. A figura 9 a) a d) refere-se à ondulação e a figura 10 a) a d) refere-se à vaga.

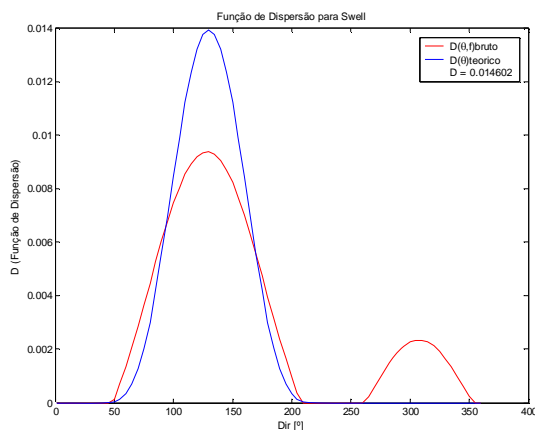
a)



b)



c)



d)

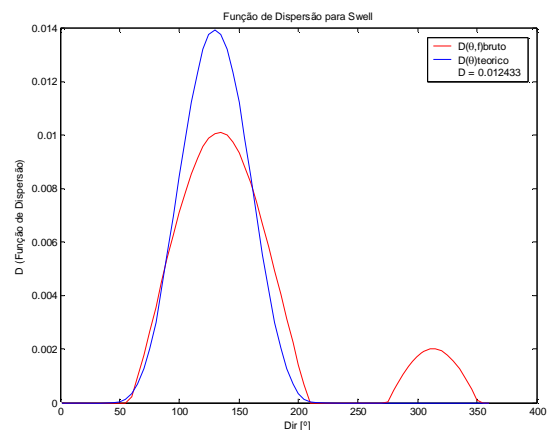


Figura 9 a), b) c) e d) – Comparação entre a função de dispersão do modelo estimado $D_b(f, \theta)$ e a função de dispersão do modelo teórico $D_t(\theta)$ para as frequências, $f = 0,083, 0,088, 0,092$ e $0,096$ Hz respectivamente.

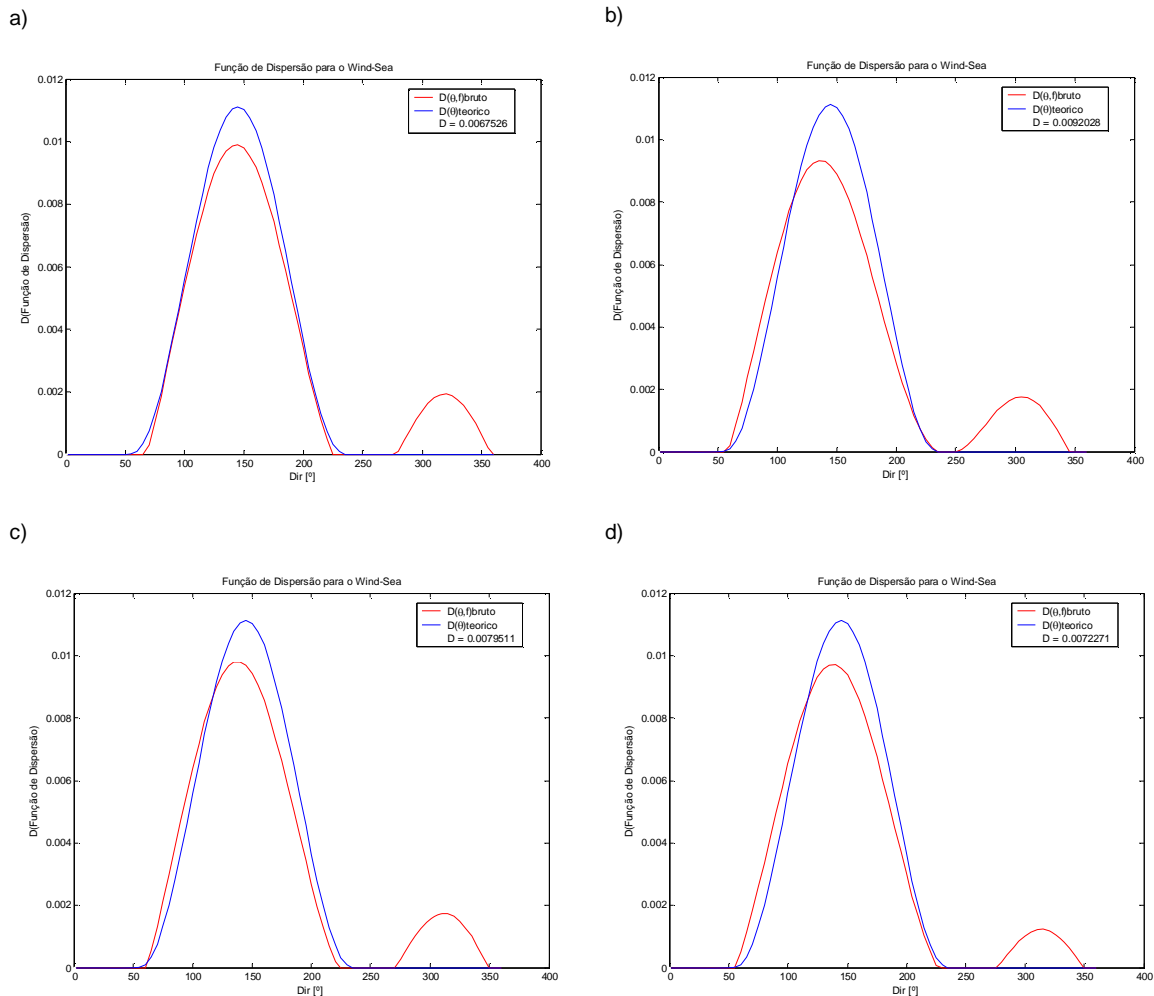


Figura 10 a), b) c) e d) – Comparação entre a função de dispersão do modelo estimado $D_b(f, \theta)$ e a função de dispersão do modelo teórico $D_t(\theta)$ para as frequências, $f = 0,158, 0,162, 0,166$ e $0,171$ Hz respectivamente.

5 Conclusões

No presente trabalho foi desenvolvida uma metodologia de separação das duas componentes e aplicada a dados direccionais da área de Sines. Pode observar-se que a metodologia foi adequadamente aplicada aos espectros que exibiam dois picos definidos. Apenas em alguns casos não foi possível determinar o ponto de separação devido aos critérios estabelecidos na separação das duas componentes do espectro. A metodologia apresentada na identificação das componentes de ondulação e vaga no espectro bimodal aparenta representar bem este tipo de espectros. Os resultados obtidos para os parâmetros estimados s e dispersão angular mostram alguma coerência. No entanto alguns dos espectros analisados apresentam os dois picos muito próximos, apresentando nestes casos algum grau de dificuldade tornando a sua identificação pouco clara.



6 Agradecimentos

Os dados utilizados neste trabalho foram recolhidos pela bóia do Instituto Hidrográfico em Sines e foram disponibilizados pela Administração do Porto de Sines.

7 Referências

Boukhanovsky, A.V., Guedes Soares, C. (2009). Modelling of Multi-peaked Directional Wave Spectra, Applied Ocean Research, doi:10.1016/j.apor.2009.06.001.

Evans, K. C., Bitner-Gregersen, E. M., Guedes Soares, C. (2006). Estimation of Wind-sea and Swell Components in a Bimodal Sea State, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering; Vol. 128, pp. 265-270.

Gerling, T.W. (1992). Partitioning sequences and arrays of Directional Ocean wave spectra into component wave systems. J. Atmos. Oceanic Technol., 9, pp. 444-458.

Guedes Soares, C. (1984). Representation of double-peaked sea wave spectra. Ocean Eng., 11, pp. 185-207.

Guedes Soares, C. (1991). On the Occurrence of Double Peaked Wave Spectra. Ocean Engng., 18, pp 167-171.

Guedes Soares, C.; Nolasco M., C., (1992). Spectral Modelling of Sea States with Multiple Wave Systems, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering; Vol. 114, pp. 278-284.

Guedes Soares, C., Henriques, A. C. (1998). Fitting a double-peak spectral model to measured wave spectra. Proceedings of the 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 1998); ASME, NY, USA, Paper OMAE98-1491.

Hanson, J.L., Philips, O.M. (2001). Automated analysis of ocean surface directional spectra. J. Atmos. Oceanic Technol., 18, pp. 277-293.

Hasselmann K., et al. (1973). Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Dtsch. Hydrogr. Zeit. A8, 1-95.

Pierson, W.J., Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii. J. Geophys. Res., 69, pp. 5181-5190.

Rodriguez, G.R., Guedes Soares, C. (1999). A Criterion for the Automatic Identification of Multimodal Sea Wave Spectra. Applied Ocean Research, 21(6), pp. 329-333.

Torsethaugen, K. (1993). A Two Peak Wave Spectrum Model. Proceedings of the 12th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), ASME, NY, USA, 2, pp. 175-180.