



## V SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA Rio Grande, 07 a 09 de Novembro de 2012

### NOTA SOBRE O CÁLCULO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE ONDAS GERADAS PELO VENTO PARA USO EM CONVERSORES DE ENERGIA

Eloi Melo F<sup>o</sup>

Universidade Federal de Rio Grande,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica,  
Laboratório de Engenharia Costeira,  
Escola de Engenharia, FURG, C.P. 474, Rio Grande, RS, Brasil  
[melo.eloi@gmail.com](mailto:melo.eloi@gmail.com)

#### RESUMO

*No presente trabalho apresenta-se uma breve revisão da teoria usada no cálculo do Fluxo de Energia transmitido por ondas oceânicas, abordando o conceito do "período de energia". Apresenta-se também uma forma aproximada para cálculo do Fluxo a partir da altura significativa e do período de pico do Estado de Mar. A questão da direcionalidade do Fluxo de Energia é tratada sugerindo-se uma terminologia para o Fluxo omni-direcional. O artigo chama atenção para a importância de se levar em conta Estados de Mar com espectros bi-modais e sugere uma maneira simples de se abordar a questão. Algumas considerações sobre o uso desses resultados na estimativa da eficiência de conversores de energia são ainda brevemente discutidas.*

**Palavras-chave:** *Potencial energético de ondas, Período de Energia, Espectro de onda*

#### INTRODUÇÃO

A possibilidade de transformar a energia das ondas oceânicas em energia elétrica por aparelhos conversores especialmente projetados para essa finalidade trouxe nova motivação para estudos do clima de ondas de regiões oceânicas com vistas à determinação do potencial energético disponível. É farto o número de trabalhos publicados na literatura especializada sobre esse tópico, principalmente em países europeus (para publicações recentes ver: Iglesias et al., 2009; Rusu e Guedes Soares, 2009; Waters et al., 2009, Iglesias e Carballo, 2010 e Vicinanza et al., 2013).

O presente artigo visa fazer uma breve revisão da teoria que suporta o cálculo do potencial energético das ondas geradas pelo vento enfatizando sua aplicação prática e alertando sobre os percalços normalmente encontrados. Alguns aspectos específicos do problema, como a questão da direcionalidade do Fluxo de Energia e os cuidados com Estados de Mar bi-modais são também abordados.

#### 1. REVISÃO DE PRINCÍPIOS BÁSICOS

No intuito de simplificar a análise, esta revisão vai focar o caso de ondas em águas profundas. As idéias apresentadas, entretanto, podem ser generalizadas para águas não-profundas uma vez feitas as adaptações necessárias.

A Mecânica das Ondas ensina (ver, por exemplo, Dean e Dalrymple, 1990) que o Fluxo de Energia ( $F_{mono}$ ) transportado por uma onda monocromática - entendida aqui como onda linear, periódica (período  $T$ ), plana e progressiva - através de um plano vertical com  $l$  unidade de largura e cobrindo a faixa de profundidade em que haja movimento induzido pela onda, num intervalo de  $l$  unidade de tempo é determinado por :

$$F_{mono} = E C_g \quad (1)$$

com  $E$ =densidade de energia e  $C_g$ =velocidade de grupo da onda, dados por :

$$E = \rho g \frac{H_{mono}^2}{8} \quad (2)$$

$$C_g = \frac{g}{4\pi} f^{-1} \quad (3)$$

onde  $H_{mono}$  é a altura da onda,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $f$  a frequência da onda de período  $T$ .

Portanto, para o caso de ondas monocromáticas em águas profundas, o Fluxo de Energia pode ser calculado pela expressão:

$$F_{mono} = \frac{\rho g^2}{32\pi} H_{mono}^2 T \quad (4)$$

Observa-se que o plano acima mencionado é colocado perpendicularmente à direção de propagação das ondas uma vez que a velocidade de transporte de energia ( $C_g$ ) (na ausência de correntes) tem direção e sentido coincidentes com a direção e sentido de propagação das cristas ( $C$ ). Assim, o vetor Fluxo de Energia tem módulo dado pela Eq.(4) e mesma direção e sentido das ondas.

Observa-se também que metade do fluxo refere-se à energia potencial associada ao deslocamento vertical da superfície da água e a outra metade refere-se à energia cinética associada ao movimento das partículas de água induzido pelas ondas na coluna d'água.

A grandeza Fluxo de Energia é, por definição, dimensionalmente equivalente a Potência. No Sistema Internacional de unidades, o Fluxo tem unidade de  $[ kg m / s^3 ]$  ou  $[ (J / s) / m ]$  ou, equivalentemente,  $[ W / m ]$ . Portanto, com o plano disposto da forma acima mencionada, o Fluxo de Energia das ondas calculado pela Eq.(4) tem unidades de Watts por metro de crista.

Para ondas geradas pelo vento (as ondas “reais” do oceano), o campo de ondas encontrado num certo Estado de Mar é descrito pelo seu Espectro Direcional  $S(f, \theta)$  o qual mostra como a energia presente se distribui em termos das diferentes componentes de frequência  $f$  e direção  $\theta$  que o compõe (ver, por ex., Holthuijsen, 2007). Pela dificuldade em se determinar em detalhe a direcionalidade do campo de ondas, o Espectro Direcional é usualmente decomposto em:

$$S(f, \theta) = S(f)D(\theta|f) \quad (5)$$

onde  $S(f)$  é o Espectro de Frequência – ou, mais precisamente, a Densidade Espectral de Energia – e  $D(\theta|f)$  é uma função que controla o espalhamento angular das componentes espectrais. Na praxe comumente usada,  $D$  é considerado *simétrico* em torno de uma direção principal  $\theta_p$  (usualmente a direção do vento gerador das ondas) e definido de forma a ter área unitária para todas as frequências.

O Fluxo de Energia associado a uma dada componente espectral,  $F_c(f, \theta)$ , é dado por:

$$F_c(f, \theta) = \rho g C_g(f) S(f) D(\theta|f) d\theta df \quad (6)$$

onde  $C_g(f)$  é a Velocidade de Grupo da componente de frequência  $f$ , calculada pela Eq.(3) acima.

O Fluxo (total) de Energia ( $F$ ) correspondente a um certo Estado de Mar é dado pela soma das contribuições individuais de todas as componentes que compõem o Espectro Direcional. Usando a Eq.(6) tem-se:

$$F = \rho g \int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi D(\theta|f) d\theta C_g(f) S(f) df \quad (7)$$

Invocando-se a propriedade de área unitária da função  $D$ , chega-se a:

$$F = \rho g \int_0^\infty C_g(f) S(f) df \quad (8)$$

A direção principal do Fluxo é  $\theta_p$ , a direção principal do Espectro Direcional, acompanhando o sentido de propagação das ondas. Usando a Eq.(3) em (8), tem-se:

$$F = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^\infty f^{-1} S(f) df \quad (9)$$

Portanto, o (módulo do) Fluxo de Energia de um campo de ondas geradas pelo vento, em águas profundas, pode ser calculado de forma exata pela Eq.(9).

A literatura da área de Conversores de Energia de Ondas (“WEC”, em inglês) que trata do cálculo do potencial energético de ondas geradas pelo vento tornou praxe o uso do parâmetro  $T_e$ , o chamado “período de energia”. A introdução de  $T_e$  na teoria acima é feita da seguinte forma. O Fluxo (Eq. 9) é expresso como:

$$F = \frac{\rho g^2}{64\pi} \cdot 16 \int_0^\infty S(f)df \cdot \frac{\int_0^\infty f^{-1}S(f)df}{\int_0^\infty S(f)df} \quad (10)$$

com,

$$H_s^2 = 16 \int_0^\infty S(f)df \quad (11)$$

$$T_e \equiv \frac{\int_0^\infty f^{-1}S(f)df}{\int_0^\infty S(f)df} \quad (12)$$

onde  $H_s$  é a altura significativa e  $T_e$ , por definição, é o período de energia supra citado.

Usando as equações acima, chega-se a uma expressão para o Fluxo de Energia absolutamente equivalente a Eq.(9) dada em função de  $H_s$  e  $T_e$ :

$$F = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (13)$$

Na literatura de WEC's, o período  $T_e$  tem sido interpretado fisicamente como “o período de uma única onda senoidal com a mesma energia do Estado de Mar” (e.g., Iglesias et al., 2009 e Vicinanza et al., 2013). Ora, a (densidade) de energia de uma onda relaciona-se à sua altura (Eq. 2), não ao seu período. Pela definição de  $T_e$ , supõe-se que a altura dessa “única onda senoidal” seja a própria altura significativa do mar ( $H_s$ ). Entretanto, pela teoria exposta acima, o Fluxo de energia de uma onda monocromática é dado pela Eq.(4) a qual difere da Eq.(13). Na verdade, comparando-se as duas equações, constata-se que uma “única onda senoidal” de altura  $H_s$  e período  $T_e$  transportaria o dobro da energia de um espectro de ondas unidirecional (i.e. sem espalhamento angular) com altura significativa  $H_s$  e período de energia  $T_e$ . Para se garantir o mesmo Fluxo de energia o mais correto seria usar como altura da onda monocromática hipotética a grandeza  $H_{rms} = H_s/\sqrt{2}$ .

O período de energia tem sido associado também ao período “médio” das ondas (irregulares) – ver Mollison e Pontes (1992). Todavia, a teoria estatística das ondas geradas pelo vento (ver Ochi, 2010, pag. 115) apresenta como período médio o parâmetro  $\bar{T}$  definido por:

$$\bar{T} = \sqrt{\frac{\int_0^\infty S(f)df}{\int_0^\infty f^2 S(f)df}} \quad (14)$$

A Eq.(14) difere da definição de  $T_e$  (Eq.12) trazendo dúvidas sobre essa associação com o período médio.

Uma interpretação física mais recente de  $T_e$ , desvinculada da questão de transporte de energia, consta da terceira edição do livro de Goda (Goda, 2010, pag. 53 e 54). Baseado em simulações numéricas, este autor afirma que  $T_e$  aproxima muito bem o parâmetro  $T_{1/3}$  - média do terço superior dos períodos observados num registro de ondas - para Espectros uni-modais, tanto estreitos quanto largos. Goda (2010) sugere chamar esse período, numa analogia com a altura significativa, de “período significativo espectral” mas não apresenta justificativa teórica para a correlação observada. Esta interpretação é, sem dúvida, a mais promissora pois  $T_{1/3}$  é um parâmetro com sentido físico palpável.

Uma discussão pormenorizada sobre a interpretação física de  $T_e$  foge ao escopo do presente trabalho e, por ora, vamos apenas considerar que  $T_e$  seja um parâmetro que se presta ao cálculo do Fluxo de Energia associado a um dado Espectro de ondas.

No Sistema Internacional de unidades, tomando a densidade da água do mar como  $\rho = 1026 \text{ kg/m}^3$ ,  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ,  $H_s$  em  $m$ ,  $T_e$  em  $s$ , e usando  $\text{kW/m}$  como unidade para  $F$ , o Fluxo de Energia pode ser calculado pela expressão (dimensional):

$$F = 0.49 \cdot H_s^2 T_e \quad (\text{kW/m}) \quad (15)$$

A expressão acima tem sido amplamente utilizada em trabalhos de avaliação do potencial energético do mar em vários locais (ver referências citadas na introdução).

## 2. APLICAÇÃO PRÁTICA: FLUXO CALCULADO EM FUNÇÃO DE PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO ESTADO DE MAR

O cálculo exato do Fluxo de Energia - usando a Eq.(9) ou, equivalentemente, a Eq.(15) - envolve o conhecimento do Espectro de Frequência da agitação marítima. Aí reside a primeira dificuldade na aplicação prática da teoria. De fato, na maioria das aplicações, o Espectro das ondas não é conhecido (ou não está disponível) e o Estado de Mar é caracterizado de forma simplificada por meio de parâmetros característicos. Nessa seção são analisadas algumas questões relativas ao cálculo do Fluxo de Energia em função de parâmetros normalmente usados em Engenharia Oceânica/Costeira.

A caracterização de Estado de Mar mais comum usa o trio de parâmetros:  $H_s$ , altura significativa [definida pela Eq.(11)],  $T_p$ , período de pico e  $\theta_p$ , direção de pico, onde o “pico” corresponde à frequência de maior densidade de energia do espectro. Portanto, o período  $T_e$  não faz parte dessa caracterização.

Uma maneira aparentemente possível a primeira vista seria fazer uma analogia direta entre as ondas geradas pelo vento e ondas monocromáticas e calcular o Fluxo de Energia do mar real usando a Eq. (4) com  $H_s$  em lugar de  $H_{mono}$  e  $T_p$  em lugar de  $T$  (Pianca et al., 2010). Entretanto, comparando-se as Eqs.(4) e (13) verifica-se que essa abordagem levaria a uma grande superestimação do Fluxo real (de 100% se  $T_p$  for igual a  $T_e$  – ver próximo parágrafo).

A maneira correta de efetuar o cálculo do Fluxo é através da Eq.(15) na qual aparece  $H_s$ , um dos parâmetros característicos usados na prática. Pela simplicidade dessa expressão, fica-se tentado a usar a Eq.(15) simplesmente colocando  $T_p$  em lugar de  $T_e$  ... o que suscita a seguinte questão: qual a relação entre  $T_p$  e  $T_e$  ?

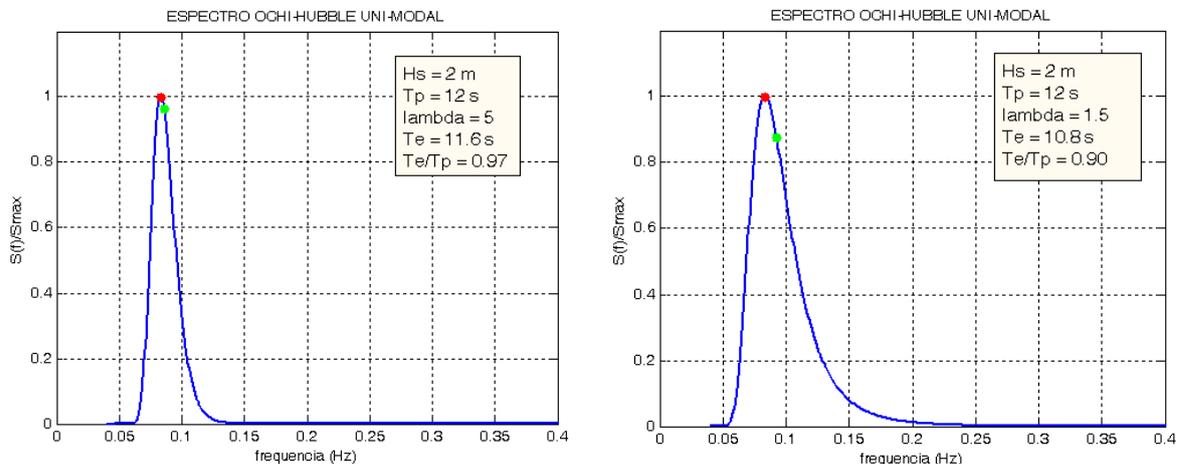
Para analisar o assunto é necessário lançar mão de espectros de frequência típicos das ondas geradas pelo vento. Dentre as várias possibilidades, em vista dos objetivos em foco, optou-se por usar o espectro parametrizado Ochi-Hubble (ver Ochi, 2005). Esse tipo de espectro tem como parâmetros de entrada:  $H_s$ ,  $T_p$  e  $\lambda$  = parâmetro de “picosidade” do espectro e, portanto, presta-se bem à presente análise.

$$S(w) = \frac{1}{4} \left[ \frac{(4\lambda + 1) \frac{w_p^4}{4}}{\Gamma(\lambda)} \right] \frac{H_s^2}{w^{4\lambda+1}} \exp \left[ -\frac{(4\lambda + 1)}{4} \cdot \left( \frac{w_p}{w} \right)^4 \right] \quad (16)$$

onde,  $w=2\pi f$ ,  $w_p=2\pi/T_p$  e  $\Gamma$  refere-se a função matemática homônima.

No espectro Ochi-Hubble, a agudez do espectro aumenta com o aumento do parâmetro  $\lambda$ . De acordo com Ochi (2005), comparações do espectro sintético acima com espectros medidos em campo indicaram que  $\lambda$  varia entre 0.5 (espectro largo) e 7 (espectro estreito) aproximadamente.

A Fig. 2 abaixo ilustra os resultados produzidos pela Eq.(16) para espectros de bandas estreita ( $\lambda=5$ ), média ( $\lambda=1.5$ ) e larga ( $\lambda=0.5$ ), todos normalizados pela ordenada do espectro na frequência de pico. A posição das frequências correspondentes a  $T_p$  e  $T_e$  - calculado pela Eq.(12) - bem como a relação entre esses parâmetros, são também mostradas na Fig. 2.



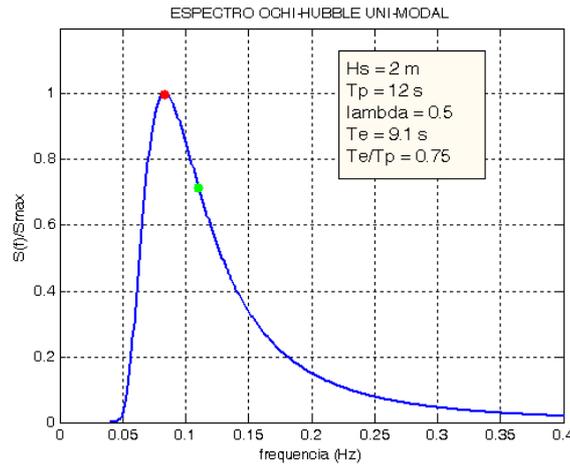


Figura 1. Espectros Ochi-Hubble normalizados pelo valor modal. No alto: Espectros estreito e médio e em baixo: Espectro largo. Pontos em vermelho correspondem a  $T_p$  e em verde a  $T_e$

A análise dos resultados mostra que a relação entre  $T_e$  e  $T_p$  depende, como esperado, da forma do espectro e, em particular, do espalhamento em frequência controlado pelo parâmetro de “picosidade”  $\lambda$ . De maneira geral, pode-se concluir que:

- Espectro estreito :  $T_e \approx 0.97 T_p$
- Espectro médio  $T_e \approx 0.90 T_p$
- Espectro largo  $T_e \approx 0.75 T_p$

A avaliação acima coincide com a apresentada em Goda (2010), pag. 54, para espectros do tipo Wallops. Na ausência de informações sobre as características do espectro da região oceânica em questão, uma possível providência seria tomar o espectro de banda média como representativo para a relação entre  $T_p$  e  $T_e$  e considerar  $T_e \approx 0.90 T_p$ . Essa relação tem sido usada em análises do potencial energético das ondas ao largo da costa canadense [ Dunnet e Wallace (2009) ].

Com isso, é possível expressar de forma aproximada o Fluxo de Energia em termos de  $H_s$  (em  $m$ ) e  $T_p$  (em  $s$ ) como:

$$F \approx 0.45 \cdot H_s^2 T_p \quad (kW/m) \quad (17)$$

A expressão acima é uma alternativa simples e interessante para cálculo do Fluxo de Energia em casos práticos a partir dos parâmetros característicos da agitação.

### 3. FLUXO OMNI-DIRECIONAL E A “POTÊNCIA” DISPONÍVEL NUM DADO CLIMA DE ONDAS

Uma questão que as vezes passa despercebida em estimativas do potencial energético de um certo sítio oceânico refere-se à questão da direcionalidade do Fluxo de Energia das ondas do mar. De fato, estudos do clima de ondas mostram que as ondas vêm usualmente de uma gama de direções diferentes. Como mostrado na revisão da teoria feita na primeira seção, o Fluxo de Energia induzido pelas ondas é uma grandeza vetorial com direção e sentido equivalente ao das ondas. Assim, se for de interesse, é possível construir histogramas direcionais do Fluxo de Energia que, na forma polar, tem o nome de “Rosas”. Para montar as “Rosas de Fluxo”, bastaria agrupar as condições de mar com direções  $\theta_p$  dentro de setores direcionais pré-estabelecidos e fazer a estatística requerida. Esse tipo de informação seria importante para conversores sensíveis à direção de incidência das ondas. Análises desse tipo tem sido feita por vários autores (ver referências citadas na introdução).

Entretanto, dependendo do tipo de conversor a ser usado, as características direcionais do Fluxo de Energia podem não ser relevantes. Esse seria o caso, por exemplo, de conversores com simetria axial que torna o aparato indiferente à direção de aproximação das ondas (e do Fluxo de Energia). Para essas situações, o interesse residiria numa avaliação “global” do Fluxo a qual incluiria todas as direções sem distinção. Num estudo climático de um certo local, esse Fluxo omni-direcional poderia ser obtido simplesmente somando os módulos do Fluxo de Energia de todos os estados de mar ocorridos no período analisado sem preocupação com suas direções. É interessante observar que o Fluxo omni-direcional é uma grandeza escalar. Na opinião do autor, talvez fosse interessante reservar a palavra “Potência” ( $P$ ) para designar o Fluxo de Energia omni-direcional (escalar) reservando o termo “Fluxo de Energia” para a grandeza vetorial.

Em aplicações práticas - por exemplo, usando dados históricos de  $(H_s, T_p)$  obtidos pelo modelo *Wave Watch III* da NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) - a “Potência” (omni-direcional) total disponível num certo sítio oceânico durante um dado intervalo de tempo pode ser calculada de forma rápida e simples por:

$$P_{total} = \sum_i 0.45 \cdot (H_s^2 T_p)_i \quad (kW/m) \quad (18)$$

com  $i$  cobrindo toda a massa de parâmetros  $H_s, T_p$  do clima de ondas no intervalo de tempo considerado (usualmente vários anos), tomando-se, porém, alguns cuidados conforme apontado na próxima seção. Normalmente se usa calcular a Potência média anual que pode ser facilmente obtida a partir da Potência total.

A unidade de  $kW$  por metro seria melhor compreendida nesse caso omni-direcional se imaginássemos um círculo em torno do “ponto” analisado o qual englobaria todas as direções indiscriminadamente.

#### 4. INCLUSÃO DE ESTADOS DE MAR COM ESPECTROS BI-MODAIS

A aplicação prática mostrada acima parte do pressuposto que todos os Estados de Mar sejam sempre resultado de um único “sistema” de ondas ou, em outras palavras, que tenham espectros uni-modais caracterizados pelos parâmetros característicos  $(H_s, T_p, \theta_p)$ . Estudos feitos na costa Sul brasileira por Araujo et (2003) e por Franco e Melo (2008) a partir de medições de onda ao largo da ilha de Santa Catarina mostraram que em cerca de 1/3 das condições de mar as ondas tem caráter bi-modal nas quais co-existem ondulações do quadrante Sul e vagas do quadrante Leste. Essa bi-modalidade característica do clima de ondas observada no Sul se mantém ao largo da costa Sudeste brasileira (Seixas, 1997) como ilustra a Figura 2 abaixo, extraída de Melo F<sup>o</sup> (1982), a qual mostra o espectro de frequência de um mar bi-modal observado ao largo de Cabo Frio no início da década de 80.

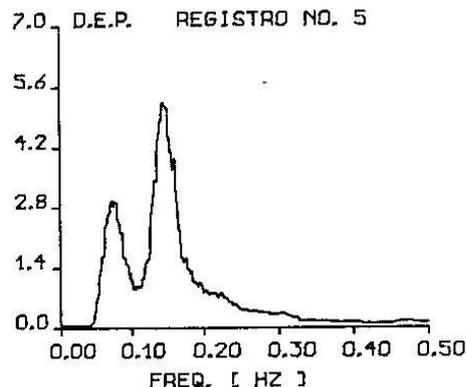


Figura 2 - Espectro bi-modal medido ao largo de Cabo Frio no início da década de 80  
A unidade do eixo vertical (D.E.P.) é  $m^2/Hz$ .

Nesse contexto, a existência de mares bi-modais reveste-se de importância numa correta avaliação do potencial energético do mar nesse trecho da costa brasileira. A raiz do problema reside na representação de um estado de mar bi-modal da mesma forma que um uni-modal, ou seja, por meio de um único trio de parâmetros característicos. Com isso, toda a energia existente no mar é atribuída (incorretamente) ao sistema de onda (vaga ou ondulação) que tiver o pico mais alto no espectro. O problema é agravado quando os dois sistemas de ondas tiverem também direções diferentes como ocorre na costa S/SE brasileira. Estudos do clima de ondas que não levem esse fato em consideração (Pianca et al, 2010) podem produzir estatísticas imprecisas para esse trecho da nossa costa. Um estudo pormenorizado sobre a ocorrência de condições de mar multi-modais ao largo da ilha de Santa Catarina é feita por Franco e Melo (2008).

A análise feita nessa seção vai focar no cálculo da Potência (omni-direcional) do mar bi-modal, com isso a direcionalidade do Fluxo de Energia pode ser relevado e o problema fica simplificado.

Admitindo a linearidade do processo, a teoria vista acima é perfeitamente compatível com um “mar duplo”. Para tanto, vamos considerar que  $S(f) = S_1(f) + S_2(f)$ , substituir na Eq. (9) lembrando que a integral da soma é igual a soma das integrais e usar o expediente empregado na Eq. (10):

$$P = \frac{\rho g^2}{4\pi} \left[ \int_0^\infty f^{-1} S_1(f) df + \int_0^\infty f^{-1} S_2(f) df \right] = 0.49 (H_{s1}^2 T_{e1} + H_{s2}^2 T_{e2}) \quad (kW/m) \quad (19)$$

onde  $H_{s1}$  e  $T_{e1}$  e  $H_{s2}$  e  $T_{e2}$  (em  $m$  e  $s$ , respectivamente) correspondem aos dois sistemas de onda que compõem o mar bi-modal.

A Eq.(19) mostra ser possível, para fins de cálculo do Fluxo de Energia, tratar os dois sistemas de onda (“mares”) que compõem um Estado de Mar bi-modal individualmente. Assim, usando a forma aproximada (Eq. 17) para cada um dos “mares”, chega-se a seguinte expressão em função dos  $H_s$ 's e  $T_p$ 's de cada “mar”:

$$P = 0.45(H_{s1}^2 T_{p1} + H_{s2}^2 T_{p2}) \quad (kW/m) \quad (20)$$

Em termos práticos, para levar em conta a bi-modalidade do clima de ondas é necessário, antes de iniciar os cálculos, identificar os casos bi-modais e fazer a separação dos sistemas de onda tratando-os de forma independente. Técnicas de separação fogem ao escopo desse trabalho, o leitor interessado pode consultar Rodrigues e Guedes Soares (1999) para uma metodologia clássica de separação baseada no Espectro de frequência. Esse expediente, entretanto, nem sempre é feito ou possível surgindo aí mais uma fonte de erro. Uma análise simplificada da ordem de grandeza do erro envolvido na desconsideração da bi-modalidade é efetuada na sequência.

Espectros bi-modais podem ser facilmente construídos pela superposição de dois espectros Ochi-Hubble - Eq.(16) - com os respectivos parâmetros de controle ( $H_{s1,2}$ ,  $T_{p1,2}$  e  $\lambda_{1,2}$ ). Simplificadamente, duas situações podem ocorrer:

- Espectros bi-modais com pico na ondulação e
- Espectros bi-modais com pico nas vagas.

Para ambos os casos, mostrados na Fig. 3, o cálculo da Potência será feito de quatro maneiras usando como valores dos parâmetros necessários ao cálculo aqueles indicados na própria figura. As quatro maneiras são as seguintes:

- cálculo exato pelo Espectro como um todo: usando a Eq.(13) com  $(H_s)_{total}$  e  $(T_e)_{total}$  dados pelas Eqs.(11) e (12), respectivamente
- cálculo exato com Espectros separados: usando a Eq.(19)
- cálculo aproximado levando em conta a bi-modalidade: usando a Eq.(20)
- cálculo aproximado ignorando a bi-modalidade: usando a Eq.(17) com  $H_s^2 = (H_s^2)_{total} = H_{s1}^2 + H_{s2}^2$  e considerando como  $T_p$  o período do pico mais alto.

Os resultados estão sumarizados na Tab. 1.

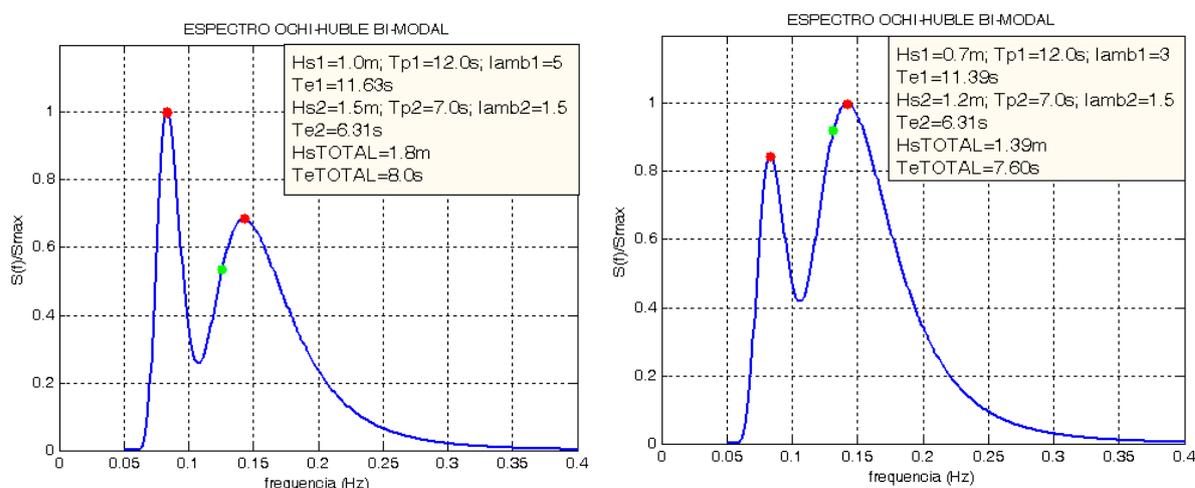


Figura 3. Espectros bi-modais Ochi-Hubble. A esquerda, caso (a): bi-modal com pico na ondulação e a direita, caso(b): bi-modal com pico nas vagas

Tabela 1. Resultados do cálculo do Fluxo de Energia em Espectros bi-modais pelas 4 maneiras indicadas

Método de cálculo	Caso (a)	Caso (b)
	Fluxo (kW/m)	Fluxo (kW/m)
(i) Eq.(13)	12.7	7.2
(ii) Eq.(18)	12.7	7.2
(iii) Eq.(19)	12.5 (erro = -1.6%)	7.2 (erro = 0)
(iv) Eq.(16)	17.5 (erro = +38%)	6.1 (erro = -15%)

É interessante observar que o primeiro Espectro, apesar de apresentar o pico mais alto no mar 1 (pico com maior densidade de energia), tem  $H_{s1} < H_{s2}$ , ilustrando que a altura do maior pico nem sempre corresponde ao mar mais energético. Isto se deve ao fato dos espectros serem funções de densidade de energia e não de energia per se. Um Estado de Mar com pico estreito e alto, logo com alta densidade de energia, pode ter um

conteúdo energético total (relacionado a  $H_s$ ) menor do que outro que possua sua densidade de energia mais distribuída, sem grande concentração no pico, mas com conteúdo energético total maior do que o primeiro.

Analisando-se a Tab.1, observa-se que:

- Métodos de cálculo exatos (i) e (ii) são realmente equivalentes.
- Cálculo aproximado (iii) levando em conta a bi-modalidade deu resultados bem próximos do exato com um erro de  $-1.6\%$  no primeiro caso e sem erro no segundo.
- Cálculo ignorando a bi-modalidade superestimou em  $38\%$  o Fluxo real no caso do espectro bi-modal com pico na ondulação e subestimou em  $15\%$  no caso do espectro bi-modal com pico nas vagas.

A análise acima objetiva apenas ilustrar o efeito da bi-modalidade no cálculo da Potência. Num caso geral, o erro decorrente da desconsideração da bi-modalidade vai depender da quantidade de energia presente nas ondulações e nas vagas e da agudez dos espectros individuais que dependem do clima de ondas local. Esse fato dificulta uma determinação precisa de um erro “médio” comum. Todavia, o exemplo acima mostra que a desconsideração da bi (ou multi) modalidade do Estado de Mar pode induzir erros significativos em regiões onde tal condição ocorra com frequência.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho abordou alguns aspectos relativos ao cálculo do potencial energético das ondas oceânicas geradas pelo vento com vistas a subsidiar o projeto/instalação de conversores de energia. Nesse item final são feitas algumas considerações simples sobre a utilização dessa informação.

Uma questão que permeia toda a análise é o fato de que todo aparato conversor terá de ser calibrado para funcionar otimamente numa certa faixa de frequência (período) da forçante: as ondas do mar. Um aspecto importante a ter em mente é que as ondas reais encontradas na superfície oceânica (geradas pelo vento) são inerentemente irregulares resultando da superposição de muitas componentes que compõem o espectro direcional do Estado de Mar. A eficiência de um dado conversor estimada substituindo-se o Estado de Mar real por uma onda (regular) monocromática de altura, período e direção fixos pode ser útil como indicativo da performance do aparelho mas não deve ser vista como a solução final do problema a qual deve contemplar a questão da irregularidade das ondas.

Mesmo numa estimativa simplificada desse tipo, restaria ainda decidir que altura e que período usar nessa onda monocromática hipotética. Seriam a altura significativa ( $H_s$ ) e o período de energia ( $T_e$ ) correspondentes ao espectro real a melhor opção? Se a idéia for contemplar toda a energia transportada pelo mar real, a resposta é: não. Para tanto, talvez fosse mais interessante usar como altura da onda monocromática ( $H_{mono}$ ) a altura média quadrática associada ao Espectro dada por (ver Dean e Dalrymple, 1990):

$$H_{mono} = H_{rms} = \frac{H_s}{\sqrt{2}} = 0.71 H_s \quad (21)$$

Quanto ao uso do período de energia como o período da onda monocromática hipotética fica a questão de como exatamente interpretar fisicamente esse parâmetro.

Outra opção seria montar a onda monocromática hipotética usando o período  $T_p$  em lugar de  $T_e$  pois o primeiro tem uma interpretação física clara: é o período da componente com maior densidade de energia do Espectro. Poder-se-ia então usar como altura monocromática uma que garantisse o mesmo fluxo de energia do Espectro de altura significativa  $H_s$ . Admitindo-se um espectro de largura média, para o qual  $T_e \approx 0.90 T_p$ , a altura correspondente seria:

$$H_{mono} = \sqrt{0.9} H_{rms} = \sqrt{\frac{0.9}{2}} H_s = 0.67 H_s \quad (22)$$

A questão da bi-modalidade do mar deve ser considerada com atenção na estimativa da eficiência de conversores de energia em locais onde essa condição seja frequente. Suponhamos que o aparelho tenha sido calibrado para funcionar otimamente para uma certa faixa de períodos. Num mar bimodal pode ocorrer que apenas parte da energia presente esteja próxima ao período ótimo considerado. Se a outra parte da energia estiver concentrada em períodos fora da faixa de calibração do aparelho a eficiência do conversor ficará comprometida. Esse problema seria agravado em conversores sensíveis à direção das ondas sujeitos a mares bi-modais com sistemas de ondas provenientes de direções diferentes.

Quanto a questão da direcionalidade do Fluxo de Energia, vale ressaltar que próximo à costa, a direcionalidade das ondas (e do Fluxo de Energia) é restringida pelo efeito da refração que faz com que as ondas se propagem num setor de direções mais fechado do que em alto mar. Esse pode ser um aspecto

positivo para conversores direcionais fixos no fundo oceânico que não teriam como se ajustar a variações do ângulo de incidência das ondas.

Finalmente, uma palavra sobre o potencial energético global das ondas é oportuna. Young (1999) examinando as características globais do clima de ondas observou que a variabilidade sazonal e os valores extremos do clima de ondas aumentam a medida que nos movemos do equador em direção a latitudes mais altas nos dois hemisférios. Porém, analisando a variação anual de  $H_s$  em dois pontos a  $50^\circ$  de latitude, um no Hemisfério Norte (Atlântico Norte) e outro no Hemisfério Sul (Oceano Antártico), Young (1999) apontou uma notável diferença entre o clima de ondas nos dois Hemisférios, qual seja, a variabilidade sazonal no Hemisfério Sul é muito menos pronunciada do que no Hemisfério Norte. De fato, em ambos os locais, as condições mais severas ocorrem no inverno com a média mensal de  $H_s$  chegando ao mesmo valor de  $6\text{ m}$ . Entretanto, durante o verão quando as condições são mais amenas,  $H_s$  mensal no Hemisfério Norte cai para  $2.3\text{ m}$  enquanto no Hemisfério Sul esse valor cai para apenas  $4\text{ m}$  (ver Young, 1999, pag 36). Essa característica das ondas do Hemisfério Norte pode ser claramente visualizada nas Rosas de  $H_s$  sazonais obtidas por Iglesias e Carballo (2010) para um sítio oceânico no extremo norte da Península Ibérica.

Pensando-se em termos da disponibilidade do potencial energético das ondas ao longo do ano, pode-se concluir que a situação mais desejável para geração de energia seja aquela do Hemisfério Sul, na qual a energia é melhor distribuída ao longo do ano. Portanto, nesse aspecto, pelo menos, estamos em vantagem !

## 6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Araujo, C.E.S., Franco, D.; Melo, E. e Pimenta, F., 2003. “Wave regime characteristics of the southern Brazilian coast”. Proceedings of the Sixth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka, Paper No. 097; pp 15.
- Dean, R.G. & Dalrymple, R.T. 1990. Water Waves for Engineers and Scientists. Advanced Series on Ocean Engineering – Vol 2; World Scientific.
- Dunnet, D. & Wallace, J.S. 2009. “Electricity generation from wave power in Canada”. Renewable Energy 34(2009) 179-195
- Franco, D. e Melo F<sup>o</sup>, E., 2008. “Relevância dos mares secundários na caracterização do regime de ondas ao largo da Ilha de Santa Catarina, SC (2002 – 2005)”. III Seminário em Engenharia Oceânica, FURG, Rio Grande. [ disponível on-line em <http://www.semengo.furg.br/2008/38.pdf> ]
- Goda, Y., 2010. Random Seas and the Design of Maritime Structures 3<sup>rd</sup> edition. Advanced Series on Ocean Engineering – Vol 33; World Scientific.
- Holthuijsen, L.H. 2007. Waves in Oceanic and Coastal Waters. Cambridge University Press
- Iglesias, G., López, M., Carballo, R., Castro A., Fraguela, J.A. e Frigaard, J., 2009. “Wave energy potential in Galicia (NW Spain)”. Renewable Energy 34, pp. 2323-2333.
- Iglesias, G. e Carballo, R., 2010. “Wave energy resource in the Estaca de Bares area (Spain)”. Renewable Energy 35, pp. 1574-1584
- Mollison, D. e Pontes, M.T. 1992. “Assessing the Portuguese Wave Power Resource”. Energy, Vol.17 (3), pp. 255-268.
- Melo F<sup>o</sup>, E., 1982. Considerações sobre a análise da agitação marítima. Tese de M.Sc. Programa de Engenharia Oceanica. COPPE/UFRJ.
- Ochi, M.K., 2005. Ocean Waves, the Stochastic Approach. Cambridge University Press.
- Pianca, C., Piero Mazzini, L. F. e Siegle, E., 2010. “Brazilian Offshore Wave Climate based on NWW3 Reanalysis”, Brazilian Journal of Oceanography, 58(1), pp. 53-70.
- Rodriguez, G. e Guedes Soares, C. 1999. “A criterion for the automatic identification of multimodal sea wave spectra”. Applied Ocean Research 21: 329–333
- Rusu, E. e Guedes Soares, C., 2009, “Numerical modeling to estimate the spatial distribution of the wave energy in the Portuguese nearshore”. Renewable Energy 34: 1501–1516.
- Seixas, N. A. B., 1997. Clima de ondas na Baía de Campos: análise de dados e proposta de parametrização. Tese de Doutorado. Observatório Nacional, Rio de Janeiro.
- Vicinanza, D., Contestabili, P. e Ferrante, V., 2013. “Wave energy potential in the north-west of Sardinia (Italy)”. Renewable Energy 50 (2013) 506-521
- Young, I.R., 1999. Wind Generated Ocean Waves. Elsevier Ocean Engineering Book Series – Vol. 2. Elsevier
- Waters, R., Engstrom, E., Isberg, J., Leijon, M., 2009. “Wave climate off the Swedish west coast”. Renewable Energy 34, pp. 1600-1606.

## 7. AVISO DE RESPONSABILIDADE

O autor é o único responsável pelo material impresso incluído neste paper.