

## Aplicação da Transformada de Hilbert-Huang para Caracterização da Dinâmica Costeira - Parte 1: Grandezas Escalares

Claudio Freitas Neves

Programa de Engenharia Oceânica/COPPE/UFRJ

neves@peno.coppe.ufrj.br,

Theo Garcia Rolim de Moura, Conceição Juana Fortes

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal

theogrm@gmail.com; jfortes@lnec.pt

Recebido: 18/11/10 - revisado: 08/03/11 - aceito: 26/04/12

---

### RESUMO

*Este trabalho tem o objetivo de comparar três técnicas de análise de dados e suas aplicações para o estudo de ondas geradas por vento: o espectro de Fourier, a ondaleta (transformada Wavelet) e a Transformada de Hilbert-Huang (HHT). São estudados exemplos de séries sintéticas da elevação da superfície livre, destacando processos não estacionários e não lineares e a representação de cada processo através de análises espectrais. Para teste da metodologia, é efetuada uma análise de séries temporais de elevação da superfície livre medidas na 2ª campanha de campo desenvolvida no âmbito do projeto BRISA (“BReaking waves and Induced SAnd transport”).*

*Palavras Chave: análise de dados; espectro de Fourier; ondaletas; transformada de Hilbert-Huang.*

---

### INTRODUÇÃO

A compreensão do comportamento de ondas de gravidade é extremamente importante para a previsão da hidrodinâmica costeira e caracterização correta da evolução morfológica de praias. O conhecimento teórico, acumulado ao longo dos últimos 70 anos, apoiou-se maciçamente na análise de Fourier e na hipótese de que a elevação da superfície do mar (as ondas) poderia ser descrita como uma série estocástica, estacionária e ergódica. Os equipamentos para medição direta ou estimativa indireta das alturas de ondas sofreram rápida evolução nos últimos 30 anos, mas sempre se fundamentaram na Teoria Linear, ou de Pequenas Amplitudes, para estabelecerem funções de transferência entre a grandeza medida e a elevação estimada da superfície livre. Desta forma, um estado de mar irregular era suposto como a superposição (infinita) de contribuições de ondas lineares, que poderiam ser analisadas através de técnicas espectrais baseadas na decomposição de Fourier do trem de ondas original. Com a sofisticação recente dos equipamentos de observação de ondas, tais como os perfiladores acústicos e os radares, obteve-se uma nova compreensão sobre o fenômeno das ondas, sobre os aspectos di-

nâmicos não lineares e, especialmente, sobre a zona de arrebentação, evidenciando as limitações das tradicionais hipóteses para descrever um estado complexo de mar.

Ao longo do desenvolvimento científico recente, elaboraram-se técnicas de observação, análise e experimentação que ampliaram a compreensão dos processos associados à geração e à propagação das ondas. Como em qualquer área da ciência, os mecanismos e técnicas utilizadas para estudar determinados processos e fenômenos de interesse sofreram adaptações, correções e finalmente foram substituídos por novas tecnologias. Dentro de temas relacionados às ondas de gravidade, diversos exemplos podem ser citados, como a evolução dos instrumentos de medição, dos modelos numéricos e de técnicas para análise de dados.

A caracterização de um estado de mar é feita através de determinados parâmetros, como a altura significativa, o período de pico, o período médio, a direção principal, entre outros. Esses parâmetros são fundamentais para estudos de engenharia costeira e portuária, de oceanografia, de geomorfologia, entre outras áreas do conhecimento. Nos últimos 50 anos, o foco da análise de ondas esteve na busca e interpretação desses parâmetros ou similares, relacionando-os com o espectro de energia.

A análise espectral surge como uma grande ferramenta para auxiliar na compreensão e observação do comportamento das ondas geradas por vento. De modo geral, essa técnica baseia-se no espectro de Fourier, de onde se constrói uma função,  $S(f)$ , que representa a densidade espectral de energia das ondas em função da frequência. A análise espectral permite apresentar e salientar a informação mais importante presente num sinal temporal  $X(t)$ , uma vez que revela periodicidades e padrões ocultos no sinal temporal.

A estimação da função de densidade espectral a partir de sinais temporais está bem documentada em diversos textos como, por exemplo, em Carvalho (1973) ou Bendat e Piersol (1986). Vários parâmetros espectrais são determinados a partir dos momentos do espectro  $S(f)$ , dentre os quais destacam-se a altura significativa,  $H_{m0}$ , o período médio  $T_z$  (ou  $T_{02}$ ) e a direção principal.

No entanto, face às hipóteses associadas à utilização da transformada de Fourier, justifica-se o questionamento quanto sua aplicabilidade a ondas geradas por vento, as quais possuem características não lineares e não estacionárias. Tais condições são verificadas, por exemplo, em regiões de geração de ondas, em regiões de águas pouco profundas ou em locais com a presença de estruturas. Através dos parâmetros espectrais citados anteriormente, seria possível caracterizar qualquer tipo de estado de mar? A não estacionariedade e a não linearidade poderiam ser desconsideradas? Quais seriam as implicações causadas pela limitação da transformada de Fourier em representar processos não estacionários e não lineares? Tais questionamentos motivaram, nos últimos 10 anos, o surgimento de outros métodos de análise de sinais temporais, como é o caso da técnica de Wavelet (Liu 2000, 2001), técnica DAAT (Parente 1999) e mais recentemente a transformada de Hilbert-Huang (Huang et al 1996, 1998, 1999).

O presente trabalho efetua uma análise comparativa da aplicação de três métodos (espectro de Fourier, técnica Wavelet e transformada de Hilbert-Huang - HHT) a séries temporais da elevação da superfície livre obtidos quer de forma teórica quer durante a campanha de campo efetuada na Costa da Caparica, Portugal, com um sensor de pressão (Infinity). Esta campanha foi realizada no âmbito do projeto BRISA - “*BR*eaking *WA*ves and *I*nduced *S*and *T*ransport”, cujo objetivo é a análise da rebentação de ondas e sua influência no transporte de sedimentos, sendo uma das tarefas do projeto a recolha e análise de dados de agitação marítima

obtidos na rebentação em duas campanhas de campo.

Após esta introdução, são apresentadas na seção 2 as características principais dos métodos de análise utilizados. Na seção 3, utilizam-se exemplos simples teóricos para ilustrar as principais diferenças que surgem da análise com cada um destes métodos. Na seção 4 aplicam-se os mesmos métodos aos dados obtidos *in situ* na campanha de campo da Costa da Caparica. Os resultados são analisados, comparados e discutidos. Finaliza-se com a seção das conclusões.

## MÉTODOS USUAIS DE ANÁLISE DE DADOS

### Análise espectral de Fourier

A análise espectral de Fourier vem sendo muito utilizada nos últimos 50 anos para estudar o clima de ondas geradas por vento. Parâmetros frequentemente empregados em projetos de engenharia, como período de pico e altura significativa, estão relacionados a momentos do espectro de energia.

Apesar da sua ampla utilização e de ser válida para diversas situações, a transformada de Fourier tem algumas restrições. Para a representação de uma série temporal  $X(t)$  através de uma expansão em série de Fourier (equação 1) é necessário que o sistema seja linear e estacionário (ergódico). Por ser um método que trata das características globais das séries (decomposição da série em senos e cossenos com fases constantes ao longo de toda a série), fica impossível obter informações relacionadas com a não estacionariedade de um determinado processo.

$$X(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) \right] \quad (1)$$

onde  $a_0, a_1, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_n$  são os coeficientes de Fourier,  $T$  é o período fundamental e  $t$  é o tempo.

### Técnica Wavelet (ou Ondaleta)

Liu (2000, 2001) utilizou o método de “Wavelet” (ou ondaleta) para o estudo de grupo de ondas. A técnica é baseada na aplicação de funções ondaleta (FO),  $\psi_{j,k}(t)$  (equação 2) sobre a série temporal  $X(t)$ , onde  $W_{j,k}(t)$  (equação 3) representa a similaridade da função  $X(t)$  com cada FO; quanto maior o valor  $W_{j,k}(t)$  maior será a similaridade de  $X(t)$  com a função ondaleta-mãe que modula o sinal analisado (Barbosa, 2008).

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{j}} \psi_0\left(\frac{t-k}{j}\right); \quad j \neq 0 \quad (2)$$

$$W_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{j}} \int_{t=1}^N X(t) \psi_0^*\left(\frac{t-k}{j}\right) dt \quad (3)$$

Cada função ondaleta possui um termo de escalamento  $j$ , o qual determina sua contração ou dilatação, e um termo de translação  $k$ , o qual indica quantas vezes cada FO é aplicada sobre a série temporal. A Figura 1 exemplifica o papel dos dois parâmetros. Essas funções são determinadas sobre uma base simples chamada de ondaleta-mãe (“Mother-wavelet”),  $\psi_0$ ; no presente trabalho será utilizada a ondaleta da função base de Morlet.

Apesar da técnica da Wavelet resolver em parte o problema da análise de processos não estacionários, processos não lineares não são bem representados. Além disso, o método baseia-se em funções matemáticas pré-definidas ( $\psi_{j,k}(t)$ ), o que pode gerar interpretações equivocadas sobre a série temporal.

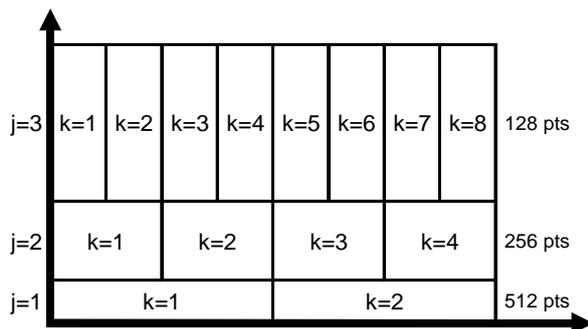


Figura 1 - Periodograma de ondaletas, identificando-se as escalas temporais  $j$  e  $k$ .

Fonte: Barbosa e Blitzkow (2008).

### Transformada de Hilbert-Huang

A Transformada de Hilbert-Huang (HHT) foi desenvolvida por Huang et al. (1996, 1998, 1999) com o objetivo de analisar processos não lineares e não estacionários. A HHT consiste numa decomposição em modos oscilatórios empíricos (EMD – “empirical mode decomposition”) do registro temporal para obter funções intrínsecas ao sistema (IMF – “intrinsic mode function”), seguida da aplicação da transformada de Hilbert às IMF. Esta técnica fornece informações sobre as frequências e amplitudes

instantâneas, de cada IMF, ao longo do tempo. Ao contrário da análise de Fourier que fornece informações sobre a série global. O conjunto das frequências e amplitudes instantâneas, para todas as IMF, gera o espectro de Hilbert, o qual permite identificar processos não estacionários e não lineares.

A HHT difere dos outros dois métodos apresentados por se basear em um método adaptativo de decomposição (EMD), baseada nas características de cada sinal, sem impor características matemáticas pré-definidas (auto-funções) à série temporal. A EMD supõe que qualquer conjunto de dados possa ser separado em um conjunto finito de funções intrínsecas simples (IMFs), cada uma satisfazendo duas características básicas:

- ser uma simples oscilação com o mesmo número de extremos e cruzamentos de zero (pode existir uma diferença de um, entre extremos e cruzamento de zeros);
- a média entre um valor de máximo e seu respectivo valor de mínimo deve ser zero.

O método de decomposição consiste nos seguintes passos (e.g. Moura 2010):

1. Localizar os máximos e mínimos da série temporal e determinar uma envoltória através de uma interpolação por um “spline” cúbico entre os valores máximos e outra interpolação entre os valores mínimos (Figura 2).
2. Determinar a média ponto a ponto entre as duas envoltórias. Caso esta série média:
  - o tenha as características de uma IMF, ela é armazenada e posteriormente subtraída do registro temporal (equação 4) e o processo de obtenção da IMF é iniciado novamente nesse novo registro ( $h_i$ ).

$$h_1 = X(t) - m_1 \quad (4)$$

onde  $X(t)$  é a série temporal,  $m_1$  é a série média e  $h_1$  é a série restante.

Não tenhas as características básicas de uma IMF, o método é repetido até obter-se a IMF (equação 5).

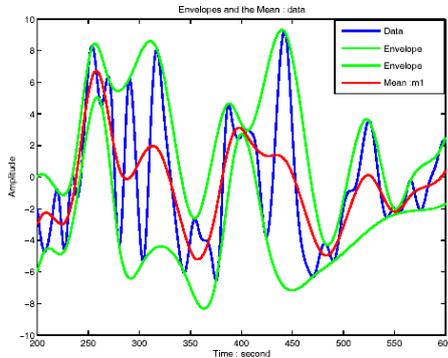
$$h_{1k} = h_{1(k-1)} - m_{1k} \quad (5)$$

O índice  $k$  é um contador que representa a repetição do processo até se obter uma IMF. Esta iteração recebe o nome de peneiramento (“sifting”). A determinação de IMFs está associada a um critério de convergência. Em algum momento, o processo de peneiramento é interrompido e o resultado é um conjunto de IMFs, mais algum resíduo (tendência) (Figura 3).

3. Aplicar a transformada de Hilbert a cada função IMF. A decomposição da série em IMFs facilita a aplicação e principalmente a interpretação do resultado obtido da transformada de Hilbert que é descrita pela equação 6, onde  $Y(t)$  é a transformada de Hilbert de uma série temporal  $X(t)$ ,  $P$  indica o valor principal de Cauchy.

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{X(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (6)$$

A transformada de Hilbert é válida para todas as funções da classe  $L^p$ , ou seja, cujo módulo elevado à potência  $p$  seja integrável no sentido de Lebesgue.



**Figura 2 - Linha azul é a série temporal, linhas verdes são as interpolações feitas para os extremos, linha vermelha é a média feita entre as duas linhas interpoladas.**

Fonte: Huang et al (1998).

4. Define-se o sinal analítico  $Z(t)$  como:

$$Z(t) = X(t) + iY(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (7)$$

$$a(t) = \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)}, \quad \theta(t) = \arctan\left(\frac{Y(t)}{X(t)}\right) \quad (8)$$

onde  $a(t)$  é a amplitude e  $\theta(t)$  é a fase. Os valores de frequência instantânea  $\omega$  podem ser obtidos através da equação 9:

$$\omega = \frac{\partial\theta}{\partial t} \quad (9)$$

O conjunto de frequências e de amplitudes instantâneas gera o espectro de Hilbert. Na seção seguinte são apresentados exemplos da aplicação da HHT conjunto com uma explicação mais detalhada sobre a apresentação gráfica do espectro de Hilbert.

## APLICAÇÃO A EXEMPLOS ANALÍTICOS

### Fundamentos teóricos

Esta seção apresenta os fundamentos da teoria de onda, com o objetivo de demonstrar a ocorrência e a importância de processos não estacionários e não lineares. Admitindo o fluido como incompressível, desprezando o atrito e considerando o escoamento como irrotacional, a equação da continuidade transforma-se na equação de Laplace (equação 10) em termos do potencial de velocidade,  $\phi$ . As equações (11, 12, 13) são, respectivamente, as condições de contorno cinemática no fundo, dinâmica e cinemática na superfície livre.

$$\nabla^2\phi = 0, \text{ em } -h < z < \eta, \quad (10)$$

$$\phi_z = 0, \text{ em } z = -h, \quad (11)$$

$$\phi_t + g\eta + \frac{1}{2}(\nabla\phi \cdot \nabla\phi) = 0, \text{ em } z = \eta, \quad (12)$$

$$\eta_t + \eta_x\phi_x + \eta_y\phi_y = \phi_z, \text{ em } z = \eta, \quad (13)$$

onde  $\eta$  é a superfície livre, os índices  $(\ )_x$ ,  $(\ )_y$ ,  $(\ )_z$  e  $(\ )_t$  representam, respectivamente, as derivadas parciais no espaço  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e no tempo  $t$ ,  $h$  representa a profundidade e  $g$  é a gravidade.

Como comentado anteriormente, ondas de gravidade possuem características não lineares, as quais estão relacionadas às duas condições de contorno na superfície livre. Dois tipos de não linearidade estão aí presentes: os termos algébricos não lineares (diz-se uma não linearidade *algébrica*); e o fato das condições de contorno serem determinadas em uma posição  $\eta$  desconhecida a priori (diz-se uma não linearidade *intrínseca*).

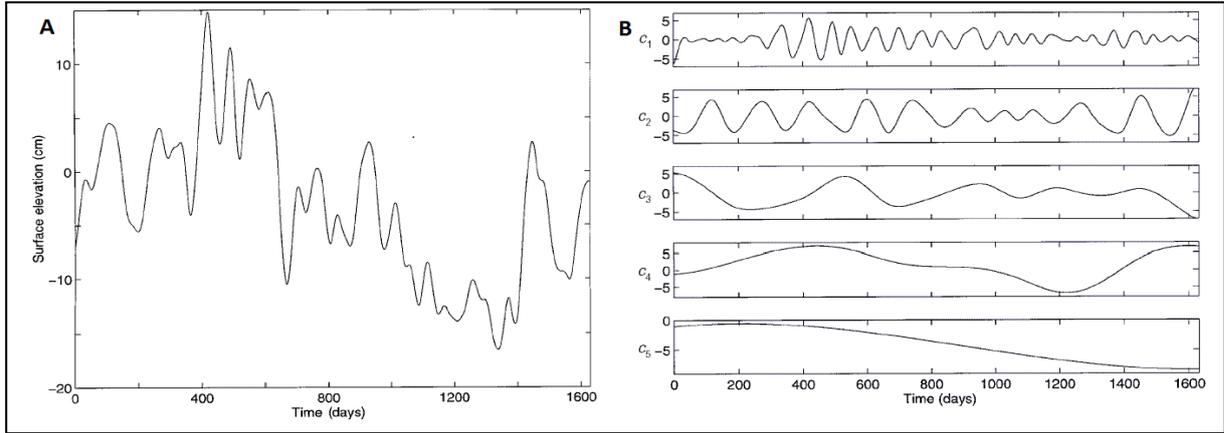


Figura 3 - A- Série temporal, B- IMFs obtidas da decomposição em modos empíricos (EMD).  
Fonte: Huang et al (1998).

Para contornar o problema da não linearidade intrínseca expandem-se os termos das condições de contorno em série de Taylor em torno de um ponto correspondente ao nível médio, no caso  $z=0$ .

Segundo a abordagem primeiramente proposta por Stokes (1847), as incógnitas do problema são então representadas através de uma série de perturbações (série de potências), ordenadas pela esbeltez da onda  $\varepsilon=H/L$ , onde  $H$  é a altura e  $L$  o comprimento da onda. O problema não linear é então convertido numa hierarquia (infinita) de problemas lineares. Simplificando as equações apresentadas aos seus termos de primeira ordem, obtém-se a solução linear para ondas de gravidade.

A Teoria Linear das ondas de gravidade prevê a formação de grupos de ondas gerados pela superposição de duas ou mais ondas com frequências próximas. Admitindo duas ondas senoidais de mesma altura  $H$ , colineares e com uma pequena diferença de período  $\Delta T$ , a superposição linear delas é descrita pela equação (14):

$$\eta = H \cos(kx - \sigma t) \cos\left[\frac{1}{2} \Delta k \left(x - \frac{\Delta \sigma}{\Delta k} t\right)\right] \quad (14)$$

Sejam então:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma - \frac{\Delta \sigma}{2}, & k_1 &= k - \frac{\Delta k}{2}, & T_1 &= T - \frac{\Delta T}{2}, \\ \sigma_2 &= \sigma + \frac{\Delta \sigma}{2}, & k_2 &= k + \frac{\Delta k}{2}, & T_2 &= T + \frac{\Delta T}{2}, \end{aligned} \quad (15)$$

onde  $\Delta \sigma$  e  $\Delta k$  são, respectivamente, as diferenças entre duas frequências ( $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ ) e dois números de ondas ( $k_1$  e  $k_2$ ). Nas mesmas equações  $\sigma$ ,  $k$  e  $T$  são as respectivas frequências, número de onda e período característicos.

A formação de grupos de onda é um processo claramente não estacionário, onde a amplitude do sinal é modulada por uma envoltória que se propaga com velocidade  $c_g = \Delta \sigma / \Delta k$ . Dessa forma, quanto menor a diferença entre as ondas incidentes, mais longa será a envoltória do grupo de onda.

Nesta seção apresentam-se exemplos da aplicação das técnicas anteriores a registros teóricos da elevação da superfície livre a fim de ilustrar o tipo de informação que se obtém com cada técnica e a representação obtida dos processos físicos.

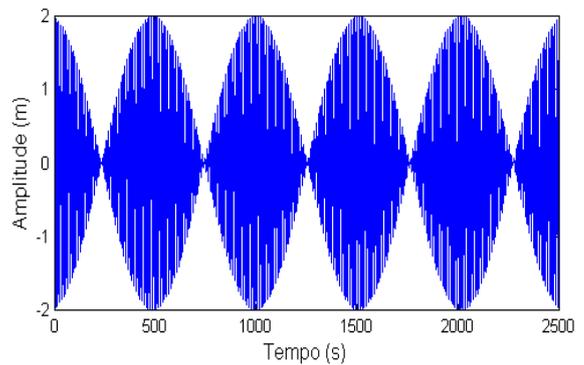


Figura 4 - Série temporal de elevação da superfície livre.

### Sobreposição de ondas

Para demonstrar as diferenças entre os resultados dos três métodos aqui considerados, considera-se a superposição de duas ondas senoidais, colineares, de mesma altura, 1 m, e períodos iguais a, respectivamente, 10 e 10,2 segundos. A Figura 4 apresenta a série temporal resultante da superposição das duas ondas. A Figura 5 apresenta os espectros de energia obtidos pelos três métodos anteriormente referidos.

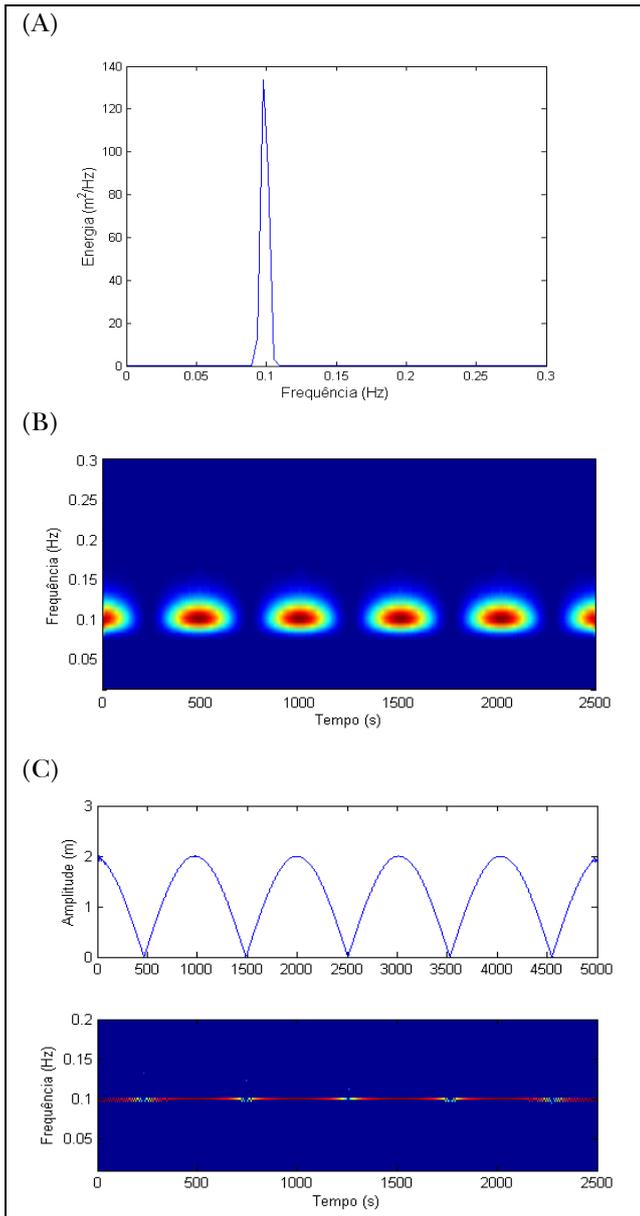


Figura 5 - Espectros de energia (m<sup>2</sup>/Hz): a) Análise de Fourier; b) Técnica Wavelet; c) Espectro de Hilbert.

Devido às características da Transformada de Fourier, as informações dos processos ao longo do tempo são perdidas, não se identificando a presença do grupo de ondas (Figura 5-A). Já a técnica de Wavelet e a HHT (Figura 5-B e C) permitem identificar a variação de energia ao longo do tempo e das frequências, embora seja notável a melhor capacidade da HHT para caracterizar a frequência e a variação de amplitude do grupo de ondas. No gráfico da Figura 5c, a variação de cor ao longo da linha posicionada na frequência de 0,1 Hz indica a modulação de amplitude, também registrada no gráfico de amplitude.

### Exemplos de processos não estacionários

Analisa-se a seguir três processos não estacionários em termos de frequência:

- Caso 1 - a série temporal tem início com uma onda de 10 s de período e amplitude de 1 m. A partir de 200 segundos a onda sofre uma alteração do seu período, para 30 s seguindo com a mesma amplitude até o final da série, Figura 6a.
- Caso 2 - a série temporal tem início com uma onda de 30 s de período e, após 200 s, seu período se altera para 10 s, Figura 6b;
- Caso 3 - sobreposição de duas ondas com 10 s e 30 s de período, ambas com 1 m de amplitude, ao longo de toda a série temporal, Figura 6c.

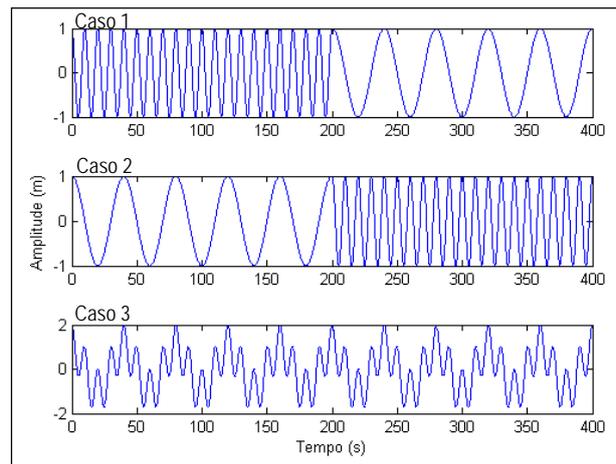
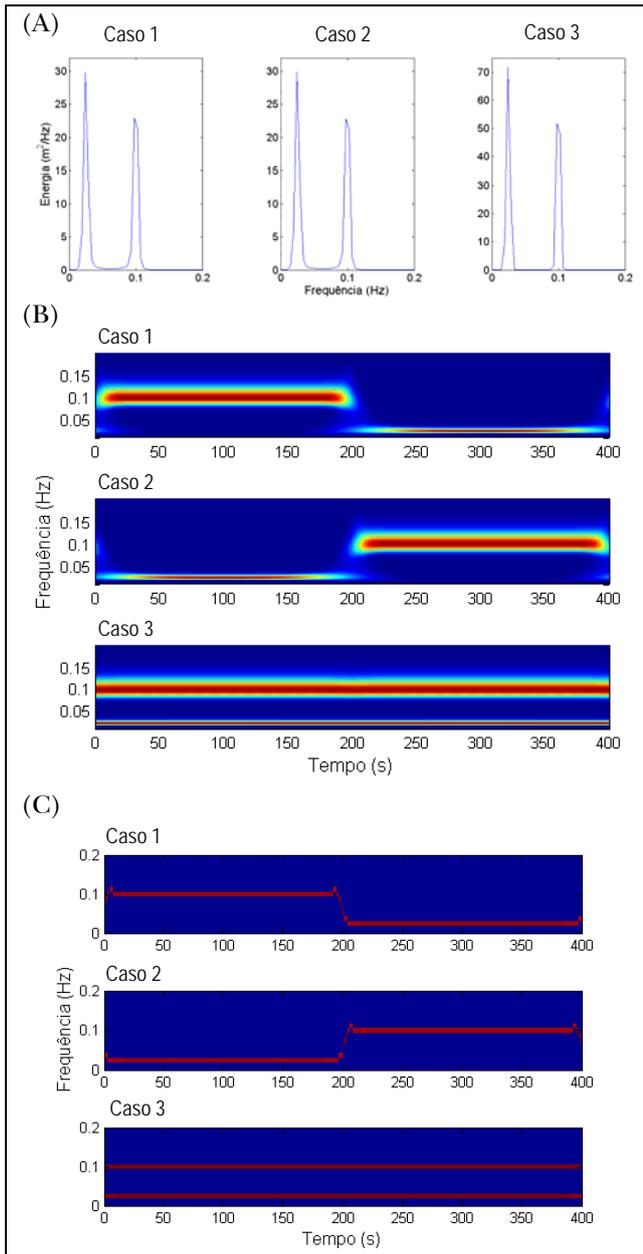


Figura 6 - Séries temporais para os três diferentes casos.



**Figura 7 - (A) Espectro de Fourier para as três séries temporais consideradas; (B) Espectro de energia pela Técnica de Wavelet; (C) Espectro de Hilbert para as três séries temporais.**

A Figura 7 apresenta os espectros de energia obtidos pelas três técnicas consideradas.

Da análise do espectro de Fourier (Figura 7A) é impossível inferir sobre a não estacionariedade do processo assim como identificar diferenças entre os três casos propostos, exceto pela magnitude da energia, que é maior no terceiro caso.

Tanto pela técnica de Wavelet (Figura 7B) como pela transformada de HHT (Figura 7C) é possível identificar a não estacionariedade do processo, i.e., é possível distinguir temporalmente a ocorrência das duas ondas. Com a HHT, verifica-se que a amplitude permanece constante (1 m) ao longo de toda a série temporal, indicado pela constância da cor vermelha ao longo de toda linha.

**Exemplos de processos não lineares: onda de Stokes**

Outro exemplo importante para a comparação dos três métodos é a representação de processos não lineares, como é o caso de uma onda de Stokes de segunda ordem (equação 16),

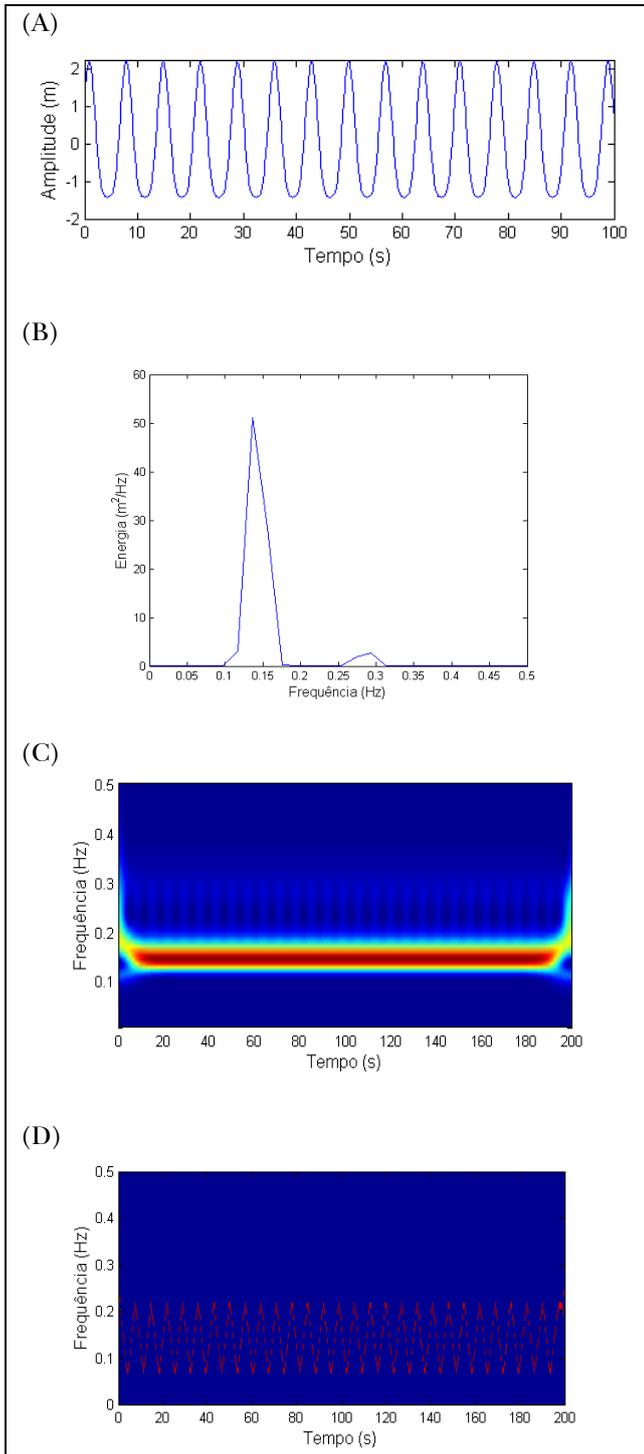
$$\eta^{(2)}(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) - \frac{kH^2}{8\sinh 2kh} + \frac{kH^2}{16} \frac{\cosh kh}{\sinh^3 kh} (3 + 2\sinh^2 kh) \cos[2(kx - \sigma t)] \quad (16)$$

A Figura 8A representa a elevação de uma onda de 2ª ordem com 1,5 m de altura, 7 s de período, a propagar-se em profundidade de 10 m. Observa-se que a componente de segunda ordem altera a simetria vertical da onda senoidal tornando as cristas mais altas e estreitas e os cavados mais achatados.

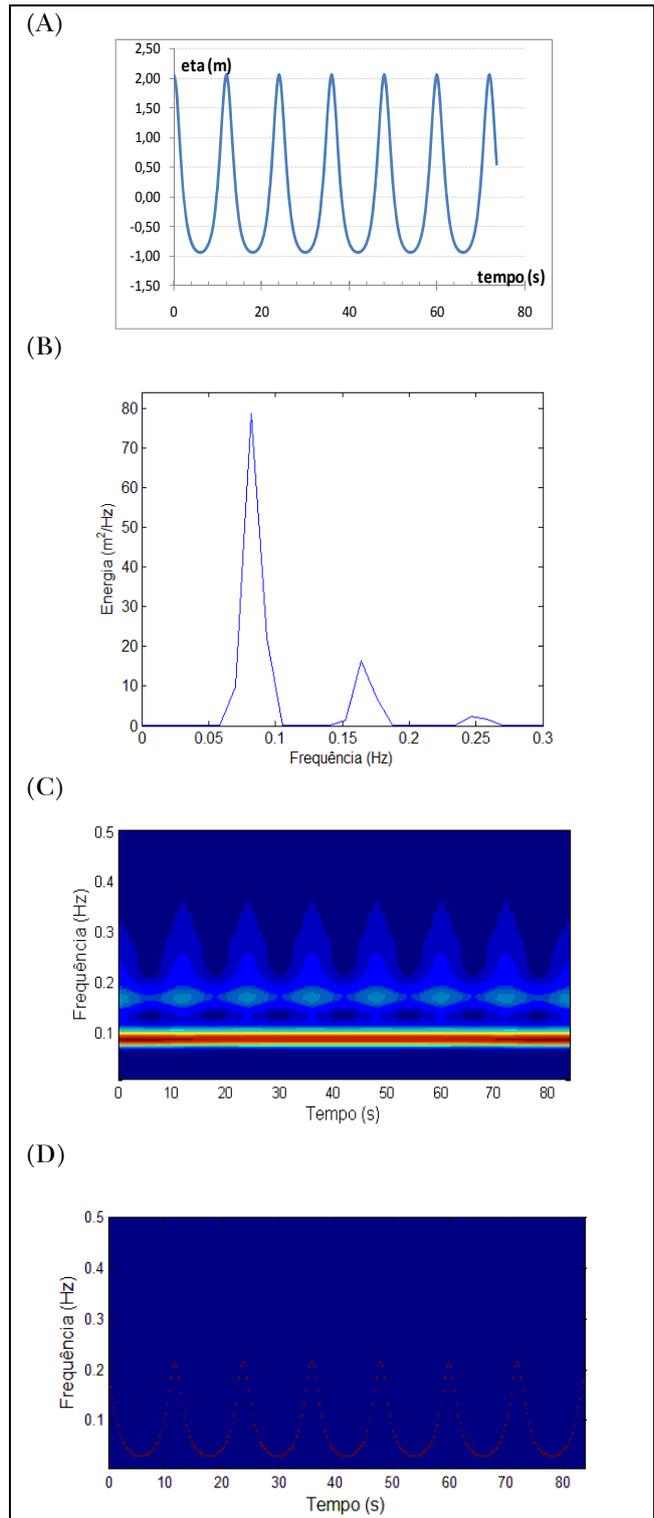
Na Figura 8 apresentam-se os espectros de energia obtidos pelas três técnicas em estudo. O espectro de Fourier (Figura 8B) identifica duas ondas, sendo que a de menor energia tem duas vezes a frequência da onda com maior energia. Através da técnica de Wavelet, é possível ver a evolução no tempo das componentes de 1ª ordem (Figura 8C) mas é difícil identificar a componente de segunda ordem. Já os resultados da HHT (Figura 8D) mostram claramente essa componente de segunda ordem, manifestado como uma oscilação da frequência instantânea.

A Figura 9A representa a superfície livre prevista pela Teoria da Função de Corrente de Dean de ordem 9 (Dean, 1965), para uma onda com altura de 3m, período de 12s e em profundidade igual a 10m. O espectro de Hilbert é mostrado na Figura 9B. Assim como visto na Figura 8C, verifica-se que a não linearidade, para uma onda monocromática,

manifesta-se como uma oscilação de frequência ao longo do tempo.



**Figura 8 - (A) Perfil de onda de Stokes (ordem 2); (B) espectro de Fourier; (C) técnica de Wavelet; (D) espectro de Hilbert-Huang.**



**Figura 9 - (A) Perfil de onda previsto pela Teoria da Função Corrente de Dean (ordem 9); (B) espectro de Fourier correspondente; (C) técnica de Wavelet; e (D) espectro de Hilbert-Huang.**

## APLICAÇÃO A DADOS OBTIDOS NA COSTA DA CAPARICA

### Descrição geral da campanha

Para exemplificar a aplicação das três técnicas de análise de dados para séries temporais *in situ*, foram utilizados os dados de elevação da superfície livre obtidos na segunda campanha de campo efetuada no âmbito do Projeto BRISA (*“BReaking waves and Induced SAnd transport”*), financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia. Esse projeto é desenvolvido no LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil em conjunto com diversas outras entidades de pesquisas de Portugal.

Esta campanha de campo foi efetuada nas imediações da praia da Cornélia (sul da praia da Saúde, Figura 10), Costa da Caparica, próximo da cidade de Lisboa, Portugal, de 11 a 15 de maio de 2010, e envolveu a coleta de informações sobre topografia, batimetria, agitação marítima, hidrodinâmica e sedimentos da zona em estudo. Estes dados são usados para validar os modelos desenvolvidos ou aprimorados durante o projeto, como é o caso dos modelos de rebentação com resolução de fase ou de média em fase e modelos de transporte de sedimentos.

A campanha geral envolveu o uso de transdutores de pressão (PT), correntômetros eletromagnéticos (ECM), Acoustic Doppler Velocimeters (ADV), OBS, e instrumentos de posicionamento geográfico (DGPS), entre outros. Para posicionamento dos diversos equipamentos foram montadas 5 estruturas em H (Figura 11).

Os dados obtidos consistem em medições simultâneas de elevação da superfície livre, velocidades de corrente, variações de pressão e concentração de sedimentos em transporte na coluna d’água, para diferentes pontos ao longo de um perfil de praia localizados na zona de rebentação (Figura 12-A). Efetuou-se, também, a medição da elevação da superfície livre a maiores profundidades, bem como a recolha de sedimentos em todos os locais com equipamento, ao longo do perfil.

No presente trabalho, foram apenas considerados os dados relativos às séries temporais de elevação da superfície livre obtidas no transdutor de pressão autônomo Infinity\_WH, adiante designado por PT01. Este equipamento encontrava-se na estrutura designada por “1ª estrutura”, na Figura 12-B, junto à linha de baixa-mar, posicionado no ponto de coordenadas 38°37’35” N e 9°13’44” W e profundidade -0,294m referenciado ao nível médio do mar.



Figura 10 - Região onde foi feita a segunda campanha de campo de Projeto BRISA.



Figura 11 - Fotografia com localização do perfil com os equipamentos e esquema com localização das estruturas H usadas na campanha. (montagem da autoria da Universidade do Algarve).

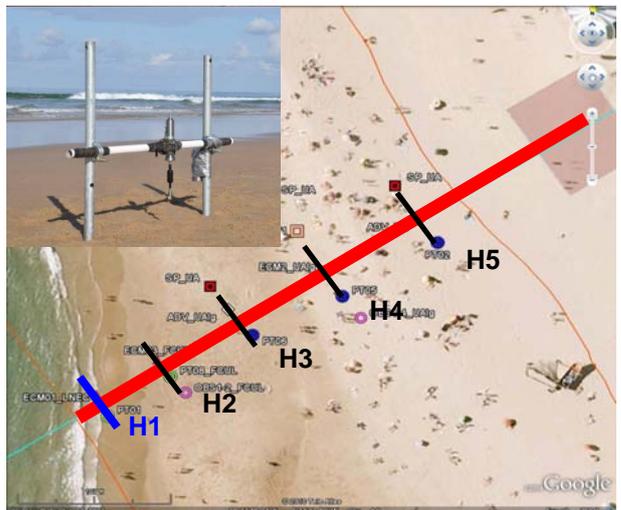
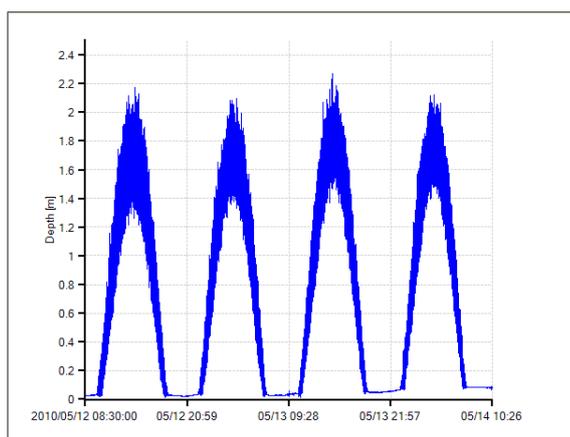


Figura 12 - Perfil da praia onde foram posicionados os equipamentos. Em destaque o correntômetro (ECM1) e o sensor de pressão (PT01).

Nos dias 12 e 13 de maio, a aquisição com PT01 foi efetuada de forma contínua durante o dia e a noite. Devido a uma avaria ocorrida no equipamento, possivelmente associada a problemas de software, a frequência de aquisição efetivamente obtida foi de 1 Hz e não aquela desejada (e programada) de 10 Hz, usual neste tipo de instrumentos. Apesar disso, os dados puderam ser aproveitados para o projeto. No dia 14, depois de identificado o problema, foi considerada a frequência correta, 10 Hz. Ver Figura 13, para o primeiro dos períodos referidos.



**Figura 13 - Elevação da superfície livre obtida pelo sensor de pressão Infinity\_WH, no ponto PT01, das 08:30 de 12-05 às 10:26 de 14-05.**

### Aplicação dos três métodos de análise

Para a aplicação dos três métodos de análise, foi selecionado o registro medido pelo Infinity WH no ponto PT01, no dia 13 de maio das 13:00 às 14:00 horas. Este registro foi dividido em 2 séries temporais de 30 minutos cada. Para cada intervalo de tempo, apresentam-se, da Figura 14 à Figura 16, os resultados obtidos pelos três métodos.

Da análise dos espectros de Fourier (Figura 14), verifica-se que as características globais das duas séries são similares, com o pico mais energético próximo à frequência de 0,1 Hz, indicando a presença de ondulações (*“swell”*). Existe um segundo pico de energia, próximo a 0,2 Hz, enquanto que no intervalo de 13:30 às 14:00, existe um terceiro pico próximo a 0,3 Hz; estes picos secundários poderiam ser indicativos tanto da presença de vagas (*“sea”*), quanto de componentes de segunda ordem ou processos não lineares após a rebentação.

Os espectros de energia resultantes da técnica de Wavelet (Figura 15), para as mesmas duas séries, apresentam distribuição de energia ao longo do tempo bem diferente para cada registro. Na Figura 15a (das 13:30 às 14:00) observa-se a ocorrência de grupos de ondas mais energéticos próximo à frequência de 0,1 Hz ao longo de quase todo o intervalo, ocorrendo, esporadicamente, valores igualmente energéticos próximo da frequência de 0,2 Hz. Já no intervalo das 13:30 às 14:00 (Figura 15b)), ocorrem menos grupos de ondas energéticos quer próximo da frequência de 0,1 Hz quer da frequência de 0,2 Hz.

A Figura 16 apresenta o espectro de Hilbert referente aos mesmos intervalos de tempo (de 13:00 até 13:30 e de 13:30 até 14:00 horas). Tanto a técnica Wavelet quanto a HHT conseguem caracterizar as variações temporais do registro de elevação, tanto em termos de amplitude como de frequência, ao contrário da técnica espectral de Fourier. Pela técnica de Wavelet identificam-se periodicidades no espectro que são mais lentas do que as ondas propriamente ditas ali presentes.

A representação das ondas pelo espectro de Hilbert, além de ser mais “focalizada” do que a técnica de Wavelet, permite determinar a frequência instantânea. Foi visto anteriormente, nas seções 3.2 a 3.4, que variações periódicas no espectro HHT são indicadoras de grupos de ondas, processos não estacionários ou não lineares. Tais comportamentos estão presentes nos registros da Costa da Caparica. Outra vantagem da HHT em relação à Wavelet é exatamente a decomposição empírica (EMD) em funções intrínsecas (IMF) características do próprio processo natural, ou seja, a HHT é um método adaptativo. Pode então ser muito ilustrativo analisar o comportamento das amplitudes das IMFs. No presente estudo, apresentam-se as IMF 2 e IMF 3 (Figura 17A), referentes ao intervalo de 13:00 até 13:30 do dia 13 de maio de 2010, para as quais são mostradas suas amplitudes e o espectro de Hilbert. É ilustrativa a comparação com o espectro Wavelet do registro de elevação (Figura 17D).

A variação de amplitude das duas IMFs indica uma possível presença de grupos de ondas, mas poderia também ser um indicativo de *“surf beats”*. As características das frequências e amplitudes dessas duas IMFs, porém, indicam que elas representam boa parte dos grupos de onda identificados através da Wavelet (Figura 17D). Ao longo do registro destaca-se o intervalo de tempo entre 200s e 400s quando ocorre a formação de grupos de onda com grande energia, coincidindo com o intervalo de tempo em que as duas IMFs apresentam maiores amplitudes.

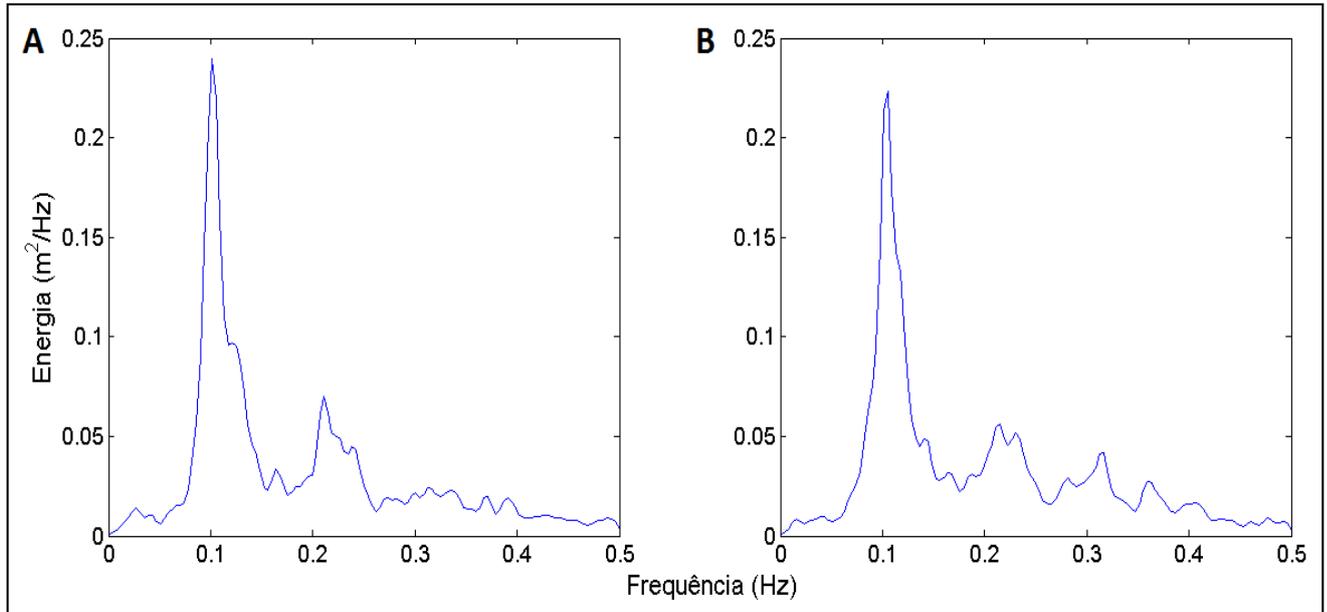


Figura 14 - Espectro de Fourier: (A) 13:00 às 13:30; (B) 13:30 às 14:00.

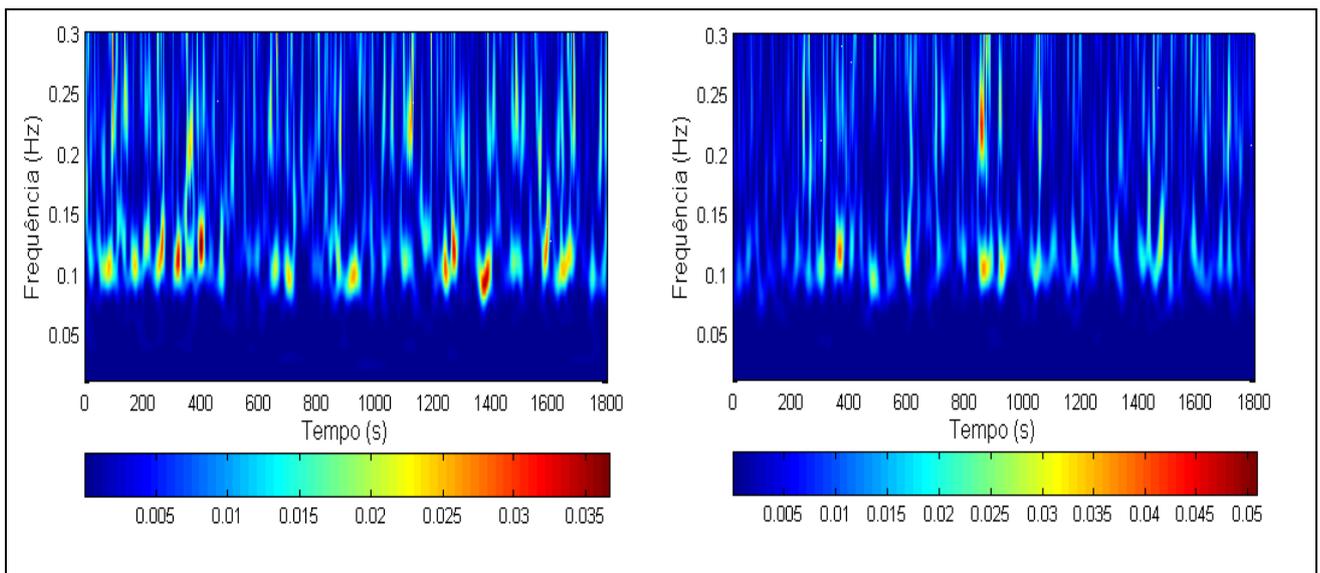


Figura 15 - Técnica de Wavelet para o registro de 13 de maio de 2010: a) das 13:00 às 13:30; b) das 13:30 às 14:00.

No entanto, no intervalo entre 800 s e 1100 s, as amplitudes são também elevadas, mas não se detectam valores significativos no gráfico da transformada Wavelet. No intervalo entre 400s e 600s, as amplitudes são baixas, especialmente para a IMF 3. Entre 1200s e 1400s no registro da Wavelet, observam-se eventos muito energéticos, embora não se detecte

nenhuma anomalia nas duas IMFs. O espectro da HHT (Figura 17C) não apresenta grandes amplitudes para o caso das duas IMFs analisadas; ocorre no entanto uma significativa diminuição em suas frequências instantâneas, em especial próximo a 400s, 700s e 1400s. Tais eventos mais energéticos podem estar associados à ocorrência momentânea de on-

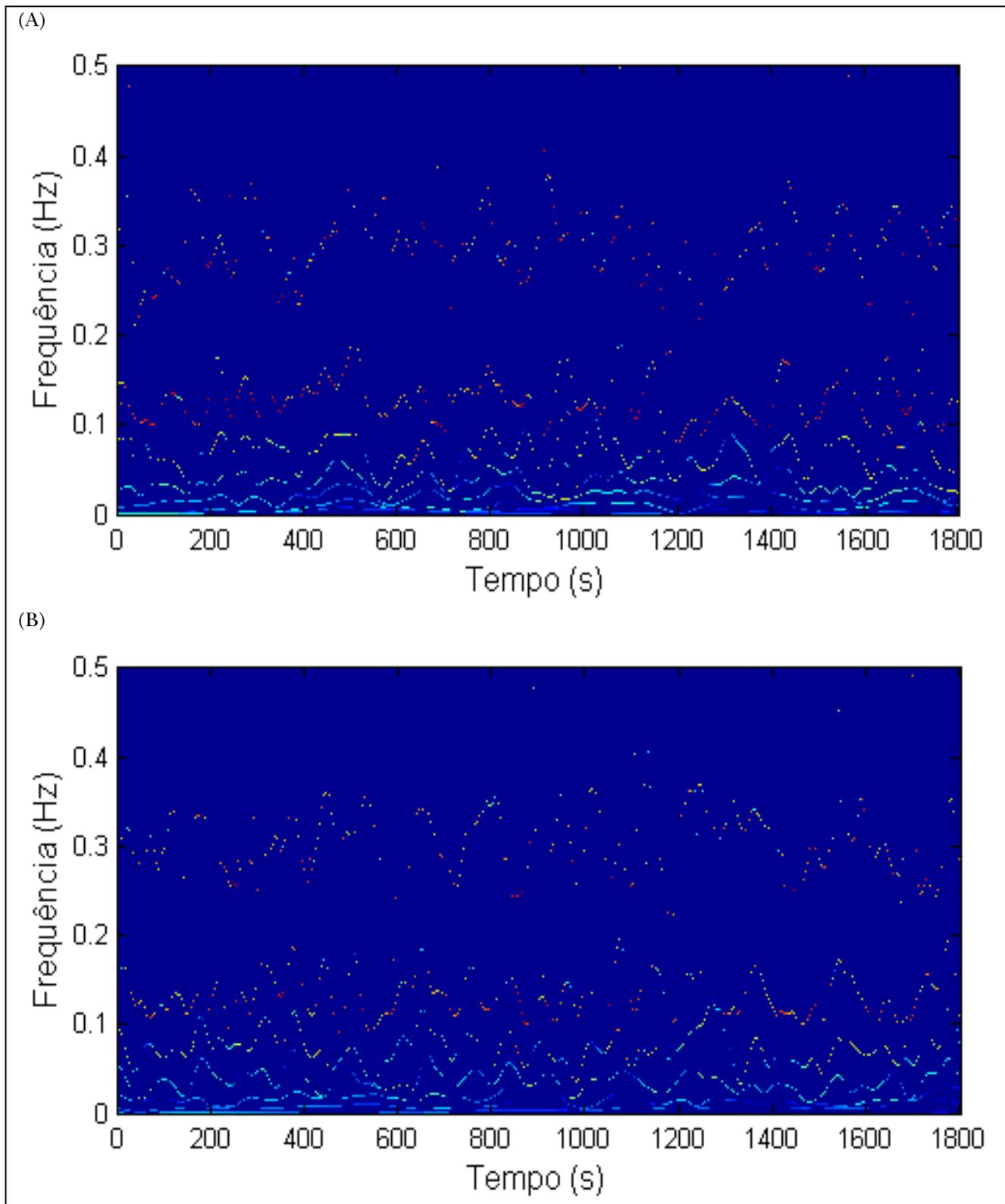


Figura 16 - Espectro de Hilbert: a) das 13:00 às 13:30 horas; b) das 13:30 às 14:00.

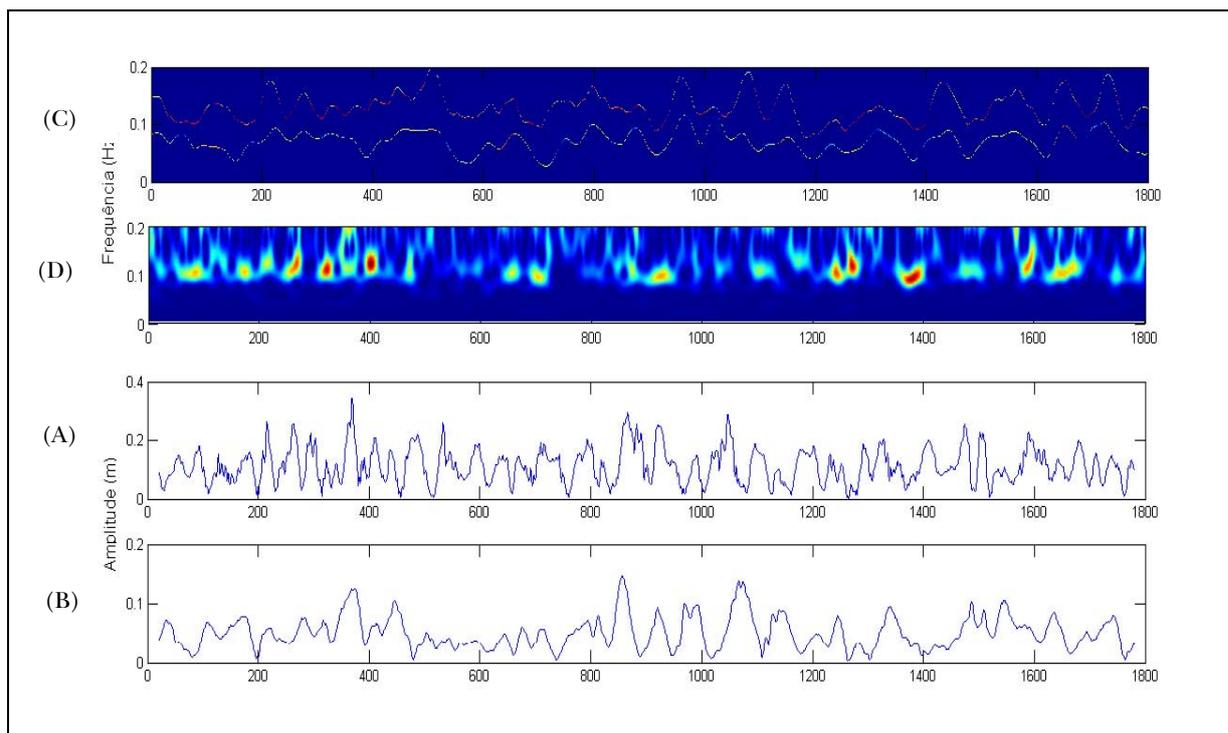


Figura 17 - Comparação entre a IMF2 e a IMF3 entre 13:00 e 13:30 do dia 13 de maio de 2010: (A) amplitude da IMF 2; (B) amplitude da IMF 3; (C) espectro de Hilbert para as duas IMFs; (D) transformada Wavelet do registro.

das de longo período, ou podem ser resultado de interações não lineares, ou ainda a presença de surf beats. Tal discussão será deixada para um futuro trabalho.

## CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentaram-se três técnicas para a análise de onda geradas por vento, nomeadamente a transformada de Fourier, a técnica de Wavelet e a transformada de Hilbert-Huang (HHT).

As três técnicas foram aplicadas inicialmente a séries temporais construídas analiticamente, com o objetivo de indicar a capacidade de cada técnica em identificar diferentes processos. Os resultados indicaram que as três técnicas possuem características positivas e negativas distintas. O espectro de Fourier não conseguiu identificar processos não-estacionários, ao contrário das técnicas de Wavelet e da HHT, as quais foram construídas para identificá-los. A técnica de Wavelet apresentou um espalhamento artificial da energia ao longo de frequências, resul-

tado das funções ondaletas escolhidas. A resposta da HHT foi a mais precisa, sendo possível identificar, nos espectros de energia, todas as frequências presentes na série temporal. A identificação das não linearidades também foi mais eficaz no caso da HHT, que se manifesta como uma oscilação da frequência instantânea no espectro de Hilbert.

As mesmas técnicas foram aplicadas aos dados obtidos *in situ* na campanha de campo realizada na praia da Cornélia, Costa da Caparica, Portugal, de 11 a 15 de maio, no âmbito do projecto BRISA. A HHT apresentou os melhores resultados, caracterizando tanto a formação de grupos de ondas, assim como a presença de harmônicos de ordem superior. Estes processos eram mascarados pelo espectro de Fourier, o que confirma a necessidade de se desenvolverem novas técnicas de análise de registros de ondas, especialmente dentro ou próximo da zona de arrebentação.

Aplicações da HHT a dados vetoriais (velocidades) e à dinâmica de sedimentos encontram-se em desenvolvimento e serão apresentadas futuramente na segunda e na terceira partes desta comunicação.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (Projeto PROCAD 0053/2007), pela Fundação de Ciência e Tecnologia (Portugal) (Projetos CAPES-FCT 242/09 e PTDC/ECM/67411/2006.) e pelo Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Os autores agradecem ao Professor Venerando Amaro e à Professora Ada Scudelari da Universidade Federal do Rio Grande do Norte e à Dra. Alessandra pela motivação para este estudo e pela cessão de dados de PUV para testes com a metodologia. O primeiro e o segundo autores agradecem especialmente ao Professor José Claudio de Faria Telles da COPPE/UFRJ pelo apoio dado ao projeto de pesquisa sobre aplicação da HHT ao estudo das ondas.

## REFERÊNCIAS

- BARBOSA, A.C.B. e BLITZKOW, D., 2008. Onduletas: História e aplicação (apostila). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.
- BENDAT e PIERSOL, 1986. Random Data Analysis and Measurement Procedures. John, Wiley & Sons., New York.
- CARVALHO, M.M., 1973. Simulação da Agitação Irregular – Técnicas Matemáticas. Tese para Especialista. LNEC. Lisboa.
- DEAN, R.G. (1965). Stream Function representation of nonlinear ocean waves, *Journal of Geophysical Research*, v.70: 4561-4572.
- HUANG N. E.; Z. SHEN; S.R. LONG; M. C. WU, 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 454, p. 903-995.
- HUANG, N. E.; S. R. LONG; Z. SHEN, 1996. The mechanism for frequency downshift in nonlinear wave evolution. *Adv. Appl. Mech.*, v. 32, p. 59-111.
- HUANG, N. E.; Z. SHEN; S. R. LONG, 1999. "A new view of nonlinear water waves. The Hilbert spectrum." *Annual Rev. Fluid Mech.*, v. 31, p. 417-457.
- LIU, P. C., 2000. Wave grouping characteristics in nearshore Great Lakes I, *Ocean Engineering*, v. 20, p. 1221-1230.
- LIU, P. C., 2001. Wave grouping characteristics in nearshore Great Lakes II, *Ocean Engineering*, v. 29, p. 1415-1425.
- MOURA, T. G. R., 2010. Aplicação da Transformada de Hilbert-Huang para o Estudo de Ondas Medidas por PUV. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ. 119p.
- PARENTE, C.E., 1999. Uma nova técnica espectral para análise direcional de ondas. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ.
- STOKES, G. G., 1847. On the theory of oscillatory waves, *Trans. Cambridge Phil. Soc.*, v. 8, n. 441-455.

### *Application of Hilbert-Huang Transform for the Characterization of Nearshore Hydrodynamics. Part 1: Scalar Quantities*

#### **ABSTRACT**

*This work presents a comparison among three data analysis techniques and their application to the study of wind waves: Fourier spectrum, wavelet and Hilbert-Huang Transform (HHT). Several examples are developed using synthetic free surface elevation data, emphasizing non-stationary and non linear properties, and their respective spectral analysis. In order to test the methodology, free surface elevation data measured during the second campaign of the BRISA project ("BRaking waves and Induced SAnd transport") were analyzed.*

**Key-words:** data analysis; Fourier spectrum; wavelets; Hilbert-Huang Transform.