

# Aplicação de diferentes técnicas para o estudo de registros temporais de elevação da superfície livre

Theo G. R. de Moura<sup>1</sup>, Claudio F. Neves<sup>2</sup>, Conceição Juana Fortes<sup>1</sup>

1-Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil 101, 1700-066 Lisboa.

tmoura@lnec.pt, jfortes@lnec.pt.

2-Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia - COPPE.

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.

neves@peno.coppe.ufrj.br

## RESUMO

Este trabalho compara três técnicas de análise de dados e suas aplicações para o estudo de ondas geradas por vento: a análise usual de Fourier, a aplicação de ondaletas e a transformada de Hilbert-Huang (HHT). São apresentados 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 das metodologias, é efectuada uma análise de séries temporais de elevação da superfície livre medidas na 2ª campanha de campo desenvolvida no âmbito do projeto BRISA (“*BR*eaking waves and *I*nduced *S*And transport”).

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise de dados, Espectro de Fourier, Ondaletas, Transformada de Hilbert-Huang.

## ABSTRACT

The article compares three techniques of data analysis and their application to the study of wind waves: the usual Fourier analysis, the wavelet technique, and the Hilbert-Huang transform (HHT). The examples of synthetic free surface elevation emphasize non stationary and nonlinear processes, and their spectral representations are shown. In order to test the methodologies, an analysis of the free surface elevation data measured during the 2<sup>nd</sup> campaign of the BRISA Project (“*BR*eaking waves and *I*nduced *S*And transport”) is performed.

**KEYWORDS:** Data analysis, Fourier spectrum, Wavelets, Hilbert-Huang Transform.

## 1. INTRODUÇÃO

A compreensão do comportamento de ondas de gravidade é extremamente importante para diversas áreas de ciência. Ao longo dos últimos 70 anos, as ondas geradas por vento receberam a atenção de diversos pesquisadores, gerando muitos conhecimentos a respeito de seu comportamento.

Nesse desenvolvimento científico foram desenvolvidas técnicas de observação, análise e experimentação, servindo como ferramentas para a compreensão de diversos processos associados a essa forçante como por exemplo: geração, propagação, interações, entre outras. Como em qualquer área da ciência, os mecanismos e técnicas utilizadas para estudar determinados processos e fenômenos de interesse sofrem adaptações, correções e frequentemente caem em desuso, devido à substituição por novas tecnologias. Dentro do tema de ondas de gravidade, diversos exemplos podem ser citados, como a evolução dos equipamentos de amostragem, dos modelos numéricos e de técnicas para análise de dados.

Algumas das razões pelas quais as ondas de gravidade despertam tanto interesse devem-se às suas características não lineares e não estacionárias. Até hoje inúmeros autores têm abordado esses temas a partir de diferentes teorias e técnicas. Uma linha muito forte dentro do estudo de ondas geradas por vento está na caracterização de um estado de mar, 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 qualquer estudo de engenharia costeira e portuária, oceanografia, entre outras áreas do conhecimento. Nos últimos 50 anos, o foco da análise de ondas esteve na busca e interpretação desses parâmetros ou similares.

A análise espectral veio como uma grande ferramenta para auxiliar na compreensão e observação do comportamento das ondas geradas por vento. De uma forma geral, essa técnica é baseada no espectro de Fourier, de onde se constrói uma função,  $S(f)$ , que representa a densidade de energia das ondas distribuída em função da frequência. A análise espectral permite apresentar e salientar as componentes mais importante presente num sinal temporal  $X(t)$ , uma vez que revela imediatamente 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 [3] ou Bendat e Piersol [2]. Vários parâmetros são determinados a partir da informação espectral fornecida pelos momentos do espectro  $S(f)$ , dentre os quais se destacam a altura significativa,  $H_{m0}$ , e o período médio  $T_z$  (ou  $T_{02}$ ).

No entanto, face às hipóteses base associadas à utilização da transformada de Fourier, pode-se questionar o significado físico de seus resultados, quando ela é aplicada a ondas geradas por vento, as quais possuem características não lineares e não estacionárias. Sendo assim surgem algumas questões como: através dos parâmetros citados acima é possível caracterizar qualquer tipo de estado de mar? A não estacionariedade e a não linearidade podem ser desconsideradas? Quais são as implicações causadas pela limitação da transformada de Fourier em representar processos que são não estacionários e não lineares?

É nesse sentido que surgiram outros métodos de análise de sinais temporais, como é o caso da técnica de Wavelet (Liu [7, 8]), a técnica DAAT (Ribeiro [9]) e, mais recentemente, a transformada de Hilbert-Huang (Huang et al [4, 5, 6]).

O presente trabalho efectua uma análise comparativa da aplicação dos 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 uma campanha de campo efetuada na Costa da Caparica, Portugal, com um sensor de pressão (Infinity). Esta campanha foi realizada no âmbito do projeto BRISA - "*BReaking waves and Induced SAnd transport*", cujo objectivo 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, no capítulo 2 são apresentadas as características principais dos métodos de análise utilizados. No capítulo 3, utilizam-se exemplos simples teóricos para ilustrar as principais diferenças que surgem da análise com cada um destes métodos. No capítulo 4 é feita então aplicação dos mesmos métodos aos dados obtidos *in situ* na campanha de campo da Costa da Caparica. Os resultados são analisados, comparados e discutidos. Finaliza este trabalho o capítulo das conclusões.

## 2. MÉTODOS DE ANÁLISE DE DADOS

### 2.1 Análise espectral de Fourier

A análise espectral de Fourier vem sendo utilizada para diversos tipos de dados em diferentes aplicações. Ao longo dos últimos 50 anos esse tem sido o método mais comum para analisar o clima de ondas geradas por vento. Como mencionado anteriormente, muitos parâmetros frequentemente utilizados, como o período de pico e a 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 possui algumas restrições. Para a representação de uma série temporal através de uma expansão em série de Fourier (equação 1) é necessário que o sistema seja linear, estacionário e 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.

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

## 2.2 Técnica Wavelet (Ondaleta)

Como foi mencionado, os processos não-lineares e não-estacionários são de grande relevância em diversas situações como em regiões de geração de ondas, em regiões de águas pouco profundas, em locais com a presença de estruturas, entre outras. Assim, nos últimos 10 anos, outros métodos têm sido utilizados no estudo de ondas geradas pelo vento. Liu [7, 8] utilizou o método de “Wavelet” (ou ondaleta) para o estudo de grupo de ondas. A técnica baseia-se na convolução de funções ondaleta (FO),  $\psi_{j,k}(t)$  (equação 2), com a série temporal  $X(t)$ , onde  $W_{j,k}(t)$  (equação 3) representa a similaridade da função  $X(t)$  com cada FO, e 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 e Blitzokow, [1]).

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

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

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 considerada a ondaleta da função base de Morlet.

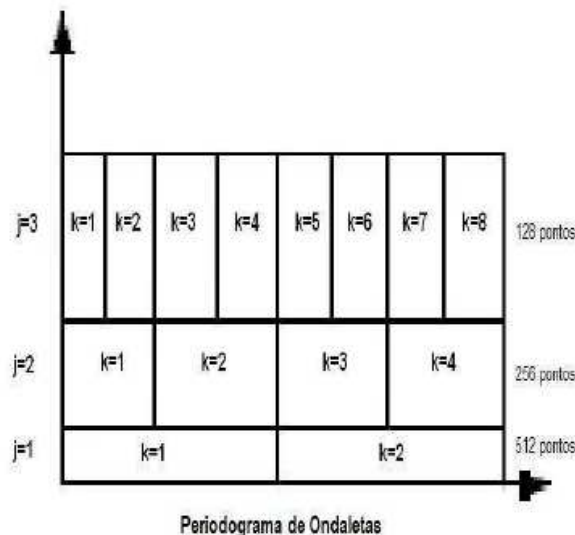


Figura 1: Resultado da análise de multi-resolução em virtude da variação dos parâmetros  $k$  e  $j$  conhecido como periodograma de ondaletas. Podem-se ver claramente as diferentes escalas da série temporal. Fonte: Barbosa [1].

Apesar da técnica da *Wavelet* resolver em parte o problema da análise de processos não estacionários, os processos não lineares não são bem representados. Além disso, o método baseia-se no uso de funções matemáticas pré-definidas ( $\psi_{j,k}(t)$ ), o que pode gerar interpretações equivocadas sobre a série temporal.

### 2.3 Transformada de Hilbert-Huang (HHT)

Outra técnica recentemente desenvolvida é a transformada de Hilbert-Huang, a qual possibilita uma análise de processos não lineares e não estacionários. Primeiramente apresentada por Huang et al [4, 5, 6], a Transformada de Hilbert-Huang (HHT) consiste numa decomposição em modos oscilatórios empíricos (EMD - “*empirical mode decomposition*”) do registro temporal, ou seja, em funções intrínsecas ao sistema, designadas por IMF - “*intrinsic mode function*”, seguida da aplicação da transformada de Hilbert sobre estas funções. Através desta técnica, obtêm-se informações, ao longo do tempo, sobre as frequências e amplitudes instantâneas de cada IMF. O conjunto dessas frequências e amplitudes instantâneas para todas as IMF geram o espectro de Hilbert. Através das informações do comportamento das frequências e amplitudes ao longo do tempo, é possível observar processos não estacionários e não lineares.

A HHT difere dos outros dois métodos apresentados anteriormente por se basear em um método adaptativo de decomposição, baseada nas características de cada sinal, ou seja, não é feita *a priori* nenhuma inferência sobre a característica da série temporal. A decomposição em modos empíricos (EMD) supõe que qualquer conjunto de dados possa ser separado em um conjunto finito de funções intrínsecas simples (IMFs), onde cada IMF possui 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 cruzamentos de zero);
- a média entre um valor de máximo e seu respectivo valor de mínimo deve ser zero.

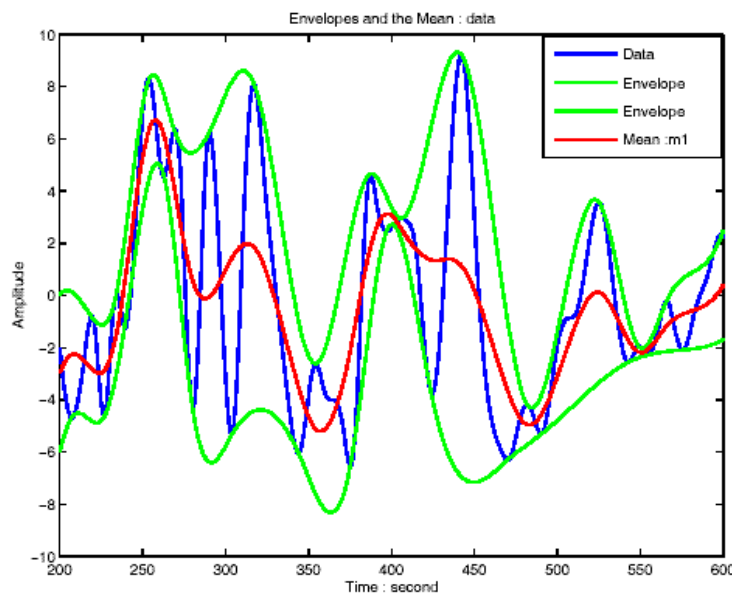


Figura 2: Linha azul é a série temporal, linhas verdes são as interpolações feitas para os extremos, linha vermelha é a média feita entre as duas linhas interpoladas. Fonte: Huang et al [6].

O método de decomposição consiste nas seguintes etapas:

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:
  - 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 ( $h_i$ );

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

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

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

onde  $X(t)$  é a série temporal,  $m$  é a série média e  $h$  é a série restante. O índice  $k$  é um contador que representa a repetição do processo até se obter uma IMF. Essa repetição do processo até se obter uma IMF é chamada de peneiramento. 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).

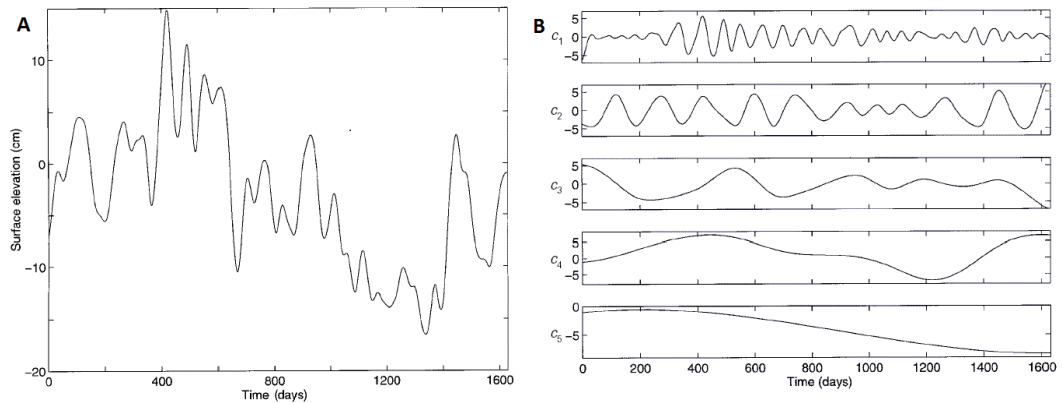


Figura 3: A - Série temporal: B - IMFs obtidas da decomposição em modos empíricos (EMD). Fonte: Huang et al [6].

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. A transformada é válida para todas as funções da classe  $L^p$  (ou seja, funções cujo módulo elevado à potência  $p$  são integráveis). Define-se um sinal analítico  $Z(t)$  como:

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

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

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

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

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

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

### 3. APLICAÇÃO A CASOS ANALÍTICOS

Nesta secção são apresentados exemplos da aplicação das técnicas anteriores a registros da elevação da superfície livre construídos analiticamente, com o intuito de ilustrar o tipo de informação que se obtêm com cada técnica.

### 3.1 Sobreposição de ondas senoidais

A partir de um simples exemplo da sobreposição de duas ondas senoidais, colineares, com a mesma amplitude de 1 metro e, respectivamente, com 10 s e 10,2 s de período, é possível demonstrar algumas diferenças nos resultados dos três métodos apresentados aqui. A Figura 4 apresenta a série temporal da superposição das duas ondas.

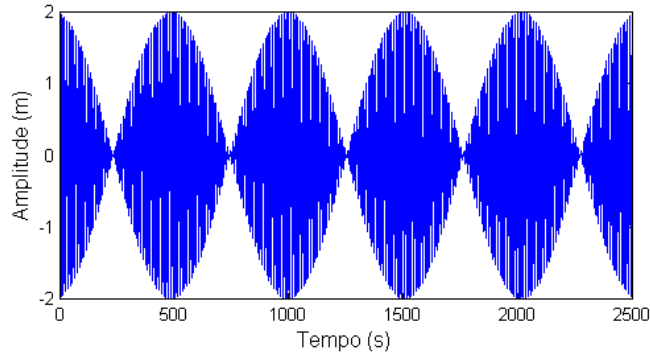


Figura 4: Série temporal de elevação da superfície livre.

A Figura 5 apresenta os espectros de energia obtidos pelos três métodos anteriormente referidos.

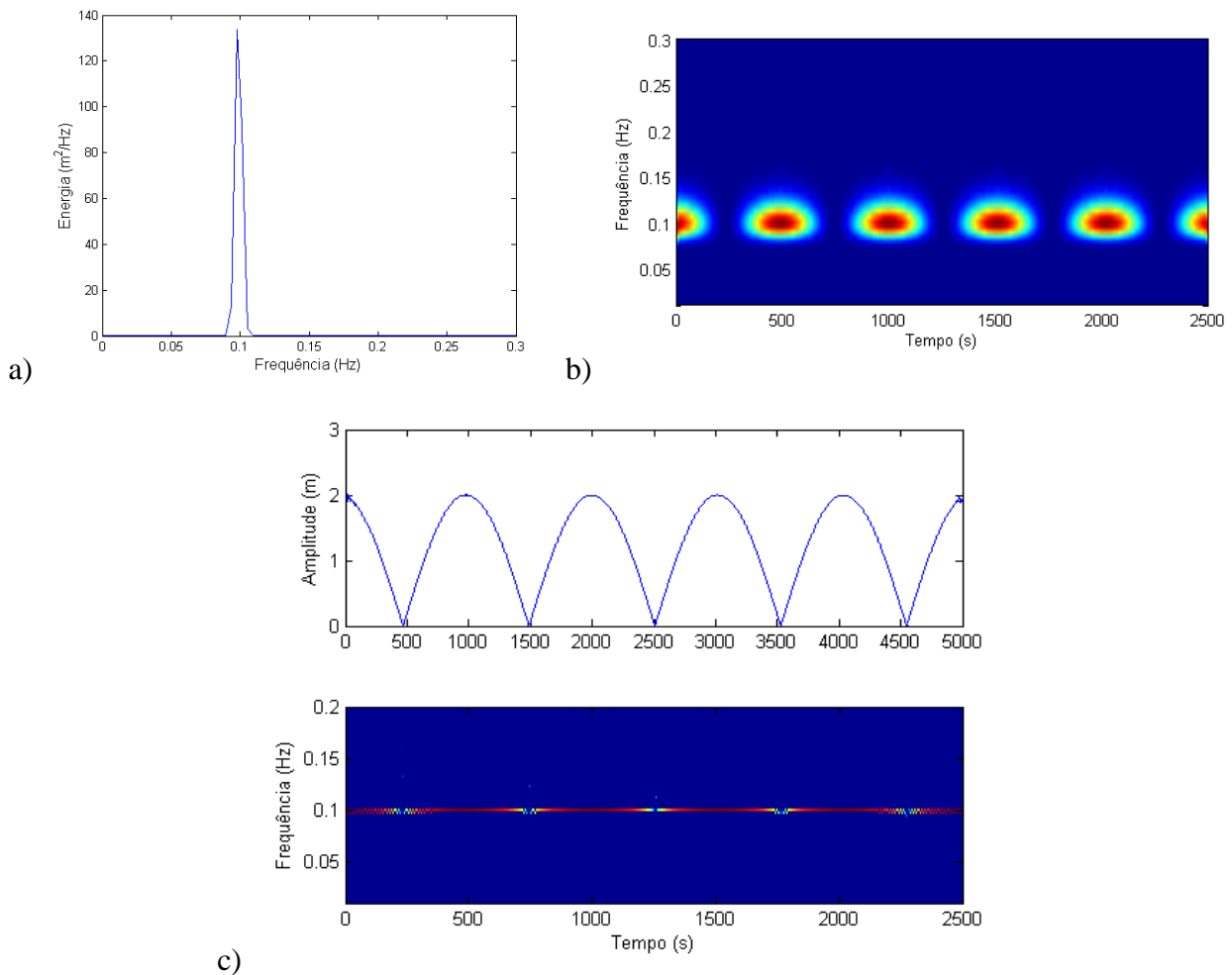


Figura 5: Espectros de energia ( $m^2/Hz$ ): a) Análise de Fourier; b) Técnica Wavelet; c) Espectro de Hilbert.

Da análise de Fourier, observa-se que, devido às características do método, as informações sobre os processos ao longo do tempo são perdidos, sendo impossível identificar a presença do grupo de ondas. Quanto à aplicação da técnica de Wavelet, é possível identificar a variação de energia ao longo do tempo e sua distribuição ao longo das frequências. Relativamente à HHT, o espectro de Hilbert oferece resultado similar ao obtido pela Wavelet, no entanto, é notável uma caracterização mais refinada da frequência e a variação de amplitude do grupo de ondas. No gráfico inferior na Figura 5c a variação de cor ao longo da linha posicionada na frequência de 0,1 Hz, indica a modulação de amplitude, também registrada na Figura 5b.

### 3.2 Análise de um processo não estacionário

Outro aspecto interessante de ser analisado pelos três métodos é a capacidade de caracterização de um processo não estacionário em termos de frequência, ou seja, no seguinte exemplo são propostas três séries temporais com as seguintes características:

- Caso 1 - a série temporal tem início com uma onda de 10 s de período e uma 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.

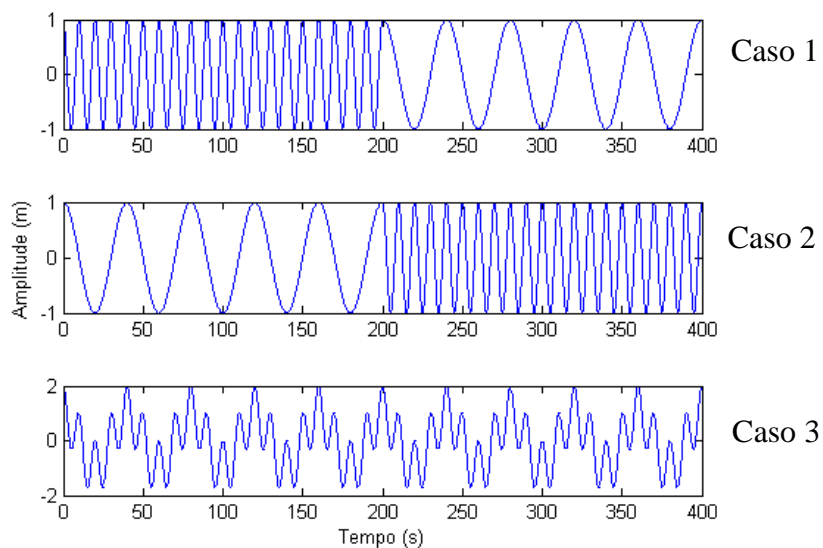


Figura 6: Séries temporais para os três diferentes casos.

Da Figura 7 à Figura 9 apresentam-se os espectros de energia obtidos com as diferentes técnicas de análise espectral de registros.

Da análise do espectro de Fourier (Figura 7) é impossível fazer inferência sobre a não estacionariedade do processo, não sendo possível identificar diferenças entre os três casos propostos. A única diferença marcante entre os três espectros está na energia, onde o último espectro apresenta uma maior energia, quando comparada aos dois primeiros casos os quais possuem quantidades de energia idênticas.

Tanto da análise com a técnica de Wavelet (Figura 8) como através da transformada de HHT (Figura 9) é possível identificar a não estacionariedade do processo, ou seja, é possível distinguir temporalmente a ocorrência das duas ondas. Finalmente da análise através da HHT fica bem claro graficamente a amplitude constante de 1 m ao longo de toda a série temporal (indicado pela constância da cor vermelha ao longo de toda linha).

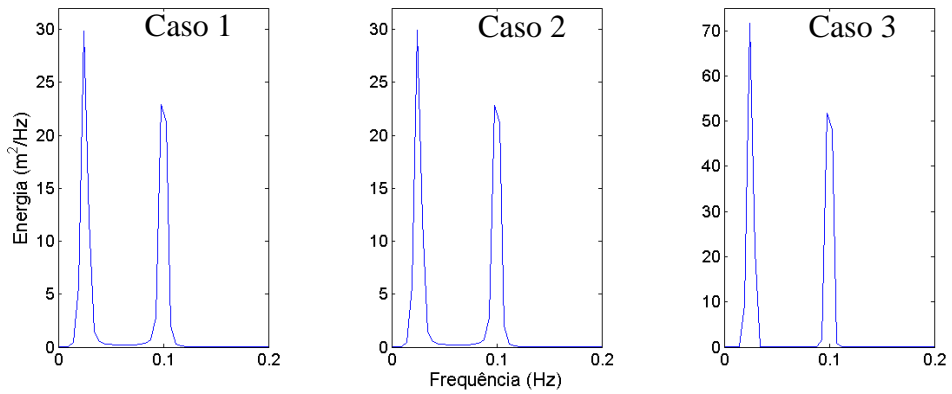


Figura 7: Espectro de Fourier para as três séries temporais.

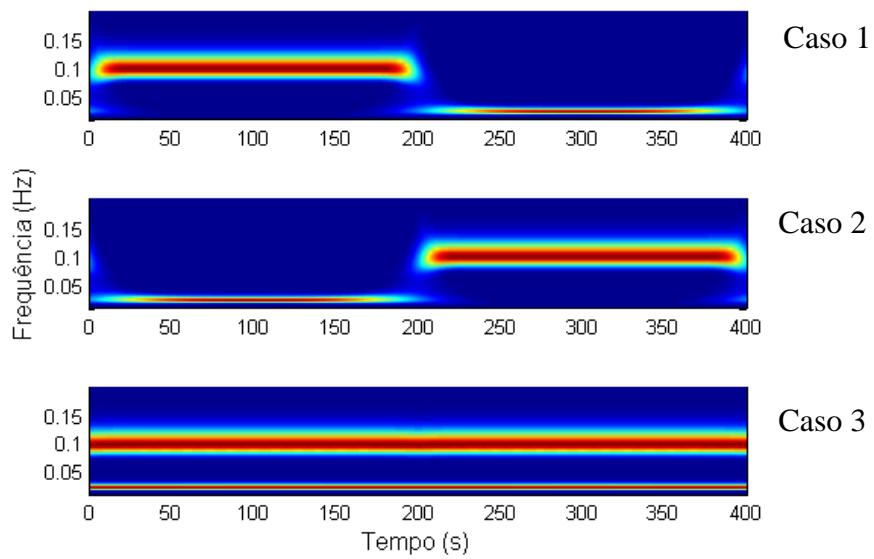


Figura 8: Técnica de Wavelet: Espectro de energia (m<sup>2</sup>/Hz).

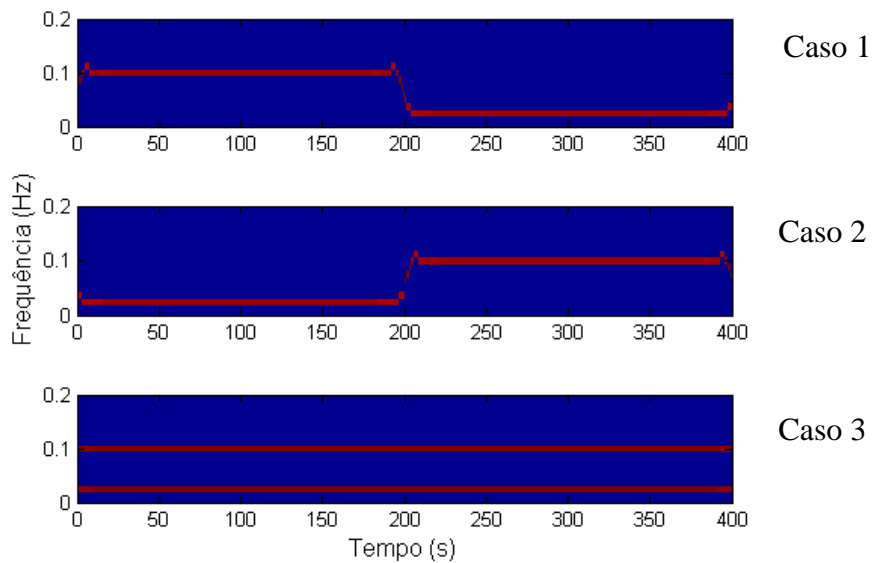


Figura 9: Espectro de Hilbert (m<sup>2</sup>/Hz) para as três séries temporais.



### 3.3 Análise de um processo não-linear (onda de Stokes 2ª ordem)

Outro exemplo importante na diferenciação dos três métodos é a representação de processos não lineares. Um primeiro exemplo pode ser a aplicação das três técnicas sobre um onda de Stokes de segunda ordem (equação 16),

$$\eta^{(2)}(t) = a \cos \sigma t - \frac{ka^2}{4} \frac{\cosh(kh)}{\sinh^3(kh)} (3 + 2 \sinh^2 kh) \cos 2\sigma t - \frac{ka^2}{2 \sinh 2kh}. \quad (10)$$

A Figura 10 representa a evolução temporal de uma onda de 2ª ordem com 1,5 m de amplitude, 7 s de período a propagar-se numa profundidade de 10 m. Observa-se que, para esta profundidade, a componente de segunda ordem possui uma ordem de grandeza significativa, o que acaba por alterar a simetria vertical da onda senoidal, tornando as cristas mais altas e estreitas e as cavas mais chatas e com uma menor amplitude. Na Figura 11 apresentam-se os espectros de energia obtidos pelas três técnicas em estudo.

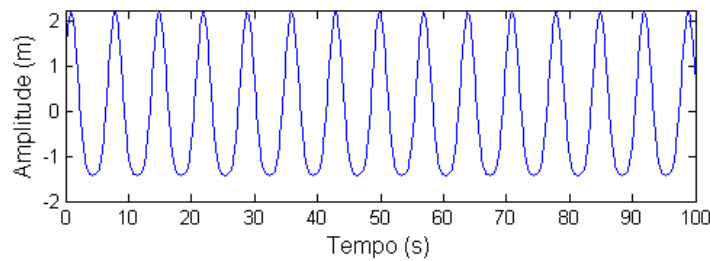


Figura 10: Onda de Stokes de segunda ordem.

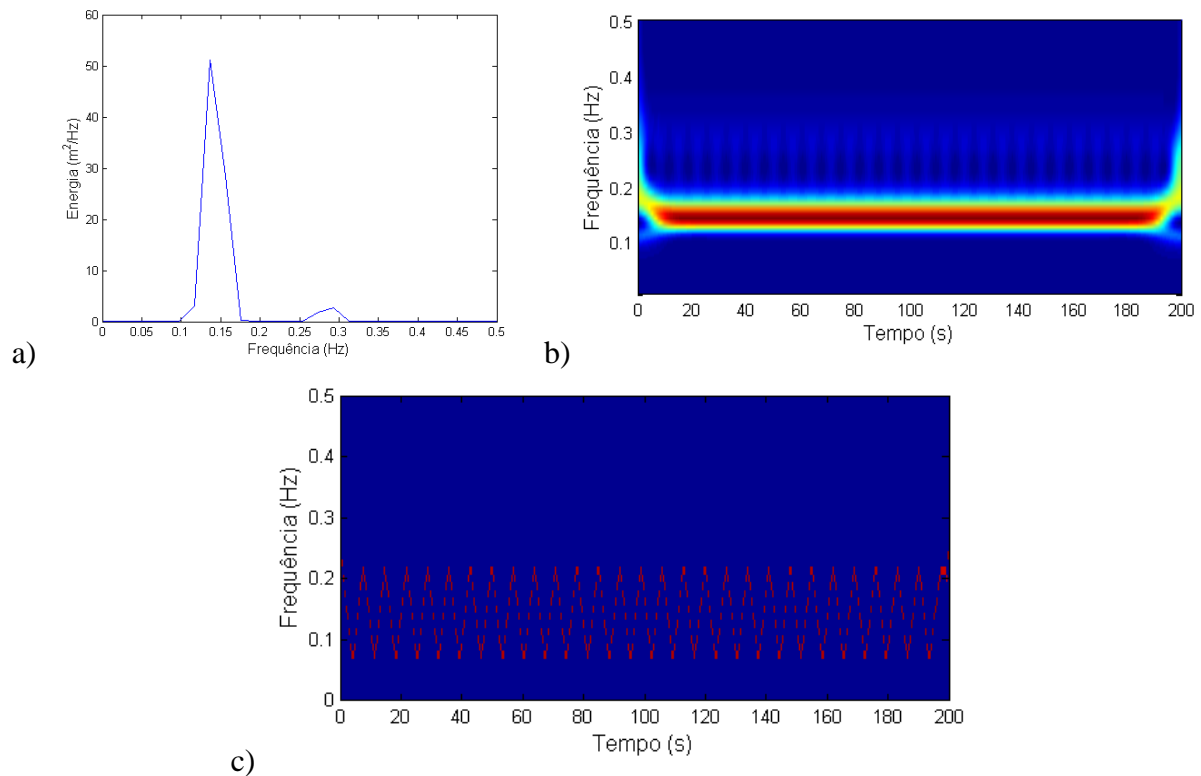


Figura 11: Espectros de energia ( $m^2/Hz$ ) para a onda de Stokes: a) Análise de Fourier; b) Técnica de Wavelet; c) Transformada de Hilbert-Huang.

Da análise de Fourier (Figura 11a) identifica-se a presença de 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 11b) mas é muito difícil identificar a componente de segunda ordem. Os resultados da aplicação da transformada de HHT (Figura 11c), mostram claramente essa componente de segunda ordem.

#### 4. APLICAÇÃO A DADOS OBTIDOS NA COSTA DA CAPARICA

##### 4.1 Descrição geral da campanha

Para a exemplificação da aplicação das três técnicas de análise de dados para séries temporais *in situ* de elevação da superfície livre são utilizadas as séries temporais de elevação da superfície livre obtidas na segunda campanha de campo efetuada no âmbito do Projeto BRISA (“*BR*eaking waves and *I*nduced *S*and transport”), financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia. Este 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 12**), Costa da Caparica próximo da cidade de Lisboa, Portugal, de 11 a 15 de maio de 2010, e envolveu a colecta de diferentes informações sobre a topografia, batimetria, agitação marítima, hidrodinâmica e sedimentos da zona em estudo. Estes dados são usados para a validação dos modelos desenvolvidos ou melhorados 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 diversos instrumentos de aquisição, tais como transdutores de pressão (PT), correntômetros electromagnéticos (ECM), Acoustic Doppler Velocimeters (ADV), Optical backscatter sensors (OBS) e instrumentos de posicionamento geográfico (DGPS). Para posicionamento dos diferentes equipamentos foram montadas 5 estruturas em H (Figura 13).

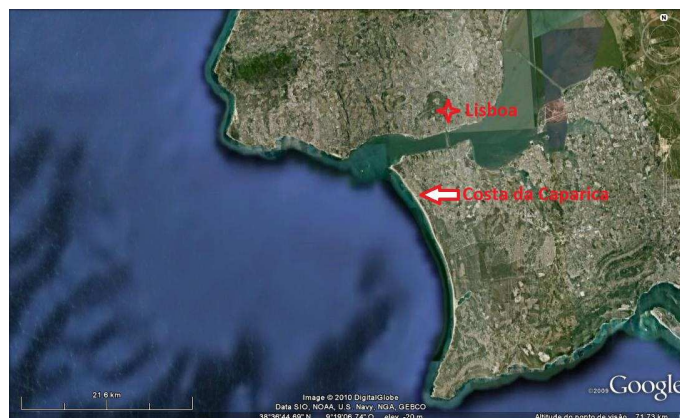


Figura 12: Região onde foi feita a 2ª campanha de campo de Projeto Brisa na Costa da Caparica.



Figura 13: Fotografia com localização do perfil com os equipamentos e esquema com localização das estruturas H usadas na campanha. (montagem da autoria da UAlg).

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 de água, para diferentes pontos ao longo de um perfil de praia localizados na zona de rebentação (Figura 14a). 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 14b, junto à linha de baixa-mar, cujo posicionamento é indicado na tabela 2.



Figura 14: a) Perfil da praia onde foram posicionados os equipamentos. b) Em destaque o Correntômetro (ECM) e sensor de pressão (PT).

Tabela 2 – Posicionamento dos equipamentos (Northing, Easting) na 1ª estrutura.

Equipamento	Posição	Longitude	Latitude	Prof. (m)
Infinity_WH	PT01	-09°13'33"	38°37'35"	-0.294

Nos dias 12 e 13 de maio de 2010, 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 um problema no software), a frequência de aquisição efetivamente obtida foi de 1 Hz (intervalos de 1 s) e não a frequência de aquisição desejada (e programada) de 10 Hz, usual neste tipo de equipamentos. Apesar disso, a aquisição efetuada pôde ser aproveitada para o projeto. No dia 14, depois de verificado o problema referido, foi considerada frequência correta, 10 Hz. Ver Figura 15, para o primeiro dos períodos referidos.

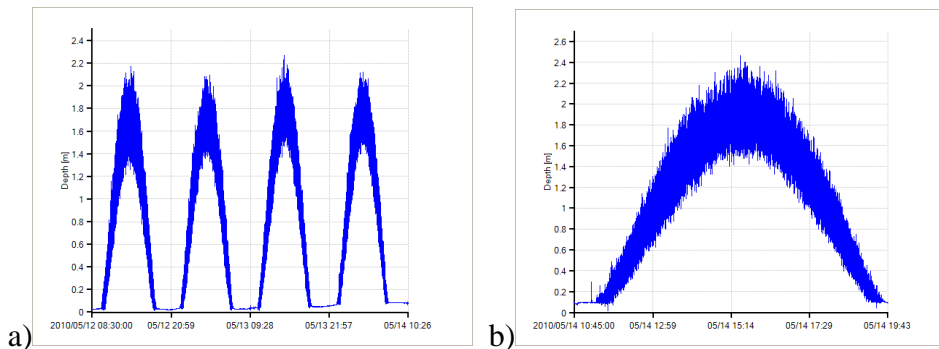


Figura 15: Dois conjuntos de dados da elevação da superfície livre obtidos pelo sensor de pressão Infinity\_WH, no ponto PT01. a) das 08:30 de 12-05-2010 às 10:26 de 14-05-2010 e b) das 10:45 de 14-05-2010 às 19:43 de 14-05-2010.

#### 4.2 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. Devido a fato do equipamento estar posicionado e uma região de águas rasas foi admitido pressão hidrostática para corrigir os dados de pressão, obtidos próximo ao fundo, em superfície livre. Para cada período de tempo, apresentam-se da Figura 16 à Figura 18 os resultados obtidos com cada um dos métodos.

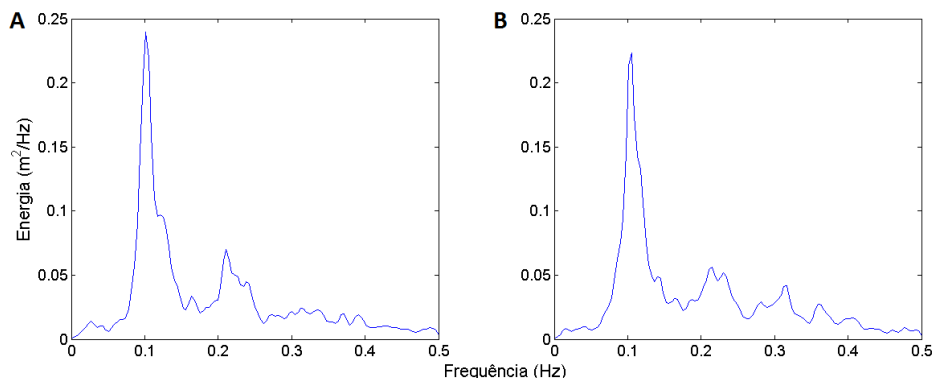


Figura 16: Espectro de Fourier: a) das 13:00 às 13:30; b) das 13:30 às 14:00.

Da análise dos espectros de Fourier (Figura 16), 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 ondas de “swell” (ondulação). Existe um segundo pico de energia, próximo a 0,2 Hz, indicando a presença de ondas “sea” (vagas). Este pico de energia também pode estar associado às componentes de segunda ordem.

Da análise dos espectros de energia resultantes da técnica de Wavelet (Figura 17), para as mesmas duas séries é possível observar que a distribuição de energia ao longo do tempo é bem diferente ao longo dos dois registros de 30 min. Na Figura 17a (das 13:30 às 14:00) pode-se observar a ocorrência de grupos de ondas mais energéticos próximo à frequência de 0,1 Hz ao longo de quase todo o período de 30 minutos. Existem esporadicamente uns valores também energéticos próximo da frequência de 0.2 Hz. Na Figura 17b (das 13:30 às 14:00) verifica-se uma menor ocorrência de grupos de ondas energéticos quer próximo da frequência de 0.1 Hz quer da frequência de 0,2 Hz.

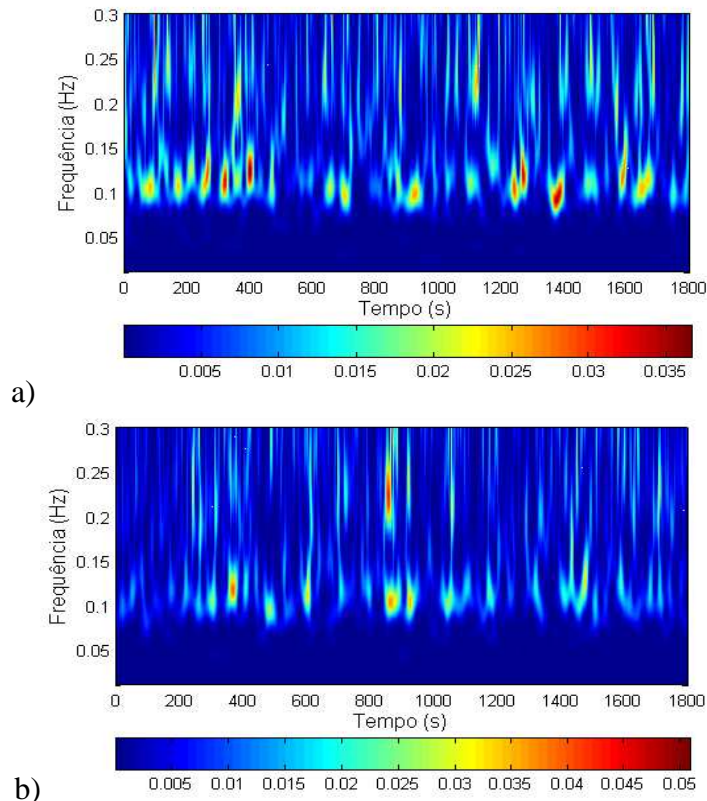


Figura 17: Técnica de Wavelet: a) das 13:00 às 13:30; b) das 13:30 às 14:00

Como foi observado através da técnica de Wavelet, a análise através da HHT (Figura 18) mostra que as características do registro de elevação variam ao longo do tempo tanto em termos de amplitude como de frequência.

Em algumas ocasiões, a representação do espectro de Hilbert pode ser de difícil interpretação e por esse motivo apresenta-se o comportamento das amplitudes de duas IMFs (IMF 2 e IMF 3) na **Figura 19a**, que também apresenta a comparação entre estes dois modos empíricos e o espectro de Wavelet do registro de elevação referente ao intervalo de 13:00 até 13:30 (**Figura 19b**).

A variação de amplitude das duas IMFs indica a presença de grupos de ondas. As características das frequências e amplitudes dessas duas IMFs indicam que elas representam boa parte dos grupos de onda identificados através da Wavelet (**Figura 19b**). Ao longo do registro destaca-se o intervalo de tempo entre 200 s e 400 s quando ocorre a formação de grupos de onda com grande energia, coincidindo com o intervalo de tempo em que as duas IMFs apresentam valores altos de amplitude. Entre o intervalo de 400 s e 600 s as duas componentes têm baixa amplitude e, em especial, a IMF 3. Comportamento semelhante observa-se entre 800 s e 1000 s. Entre 1200 e 1400 s no registro da Wavelet, observa-se eventos também muito energéticos. Apesar do espectro da HHT não apresentar nas duas IMFs analisadas grandes amplitudes, ocorre uma significativa diminuição em suas frequências instantâneas, em especial próximo a 1400 s. Esses eventos mais energéticos podem estar também associados a ocorrência momentânea de ondas com uma menor frequência.

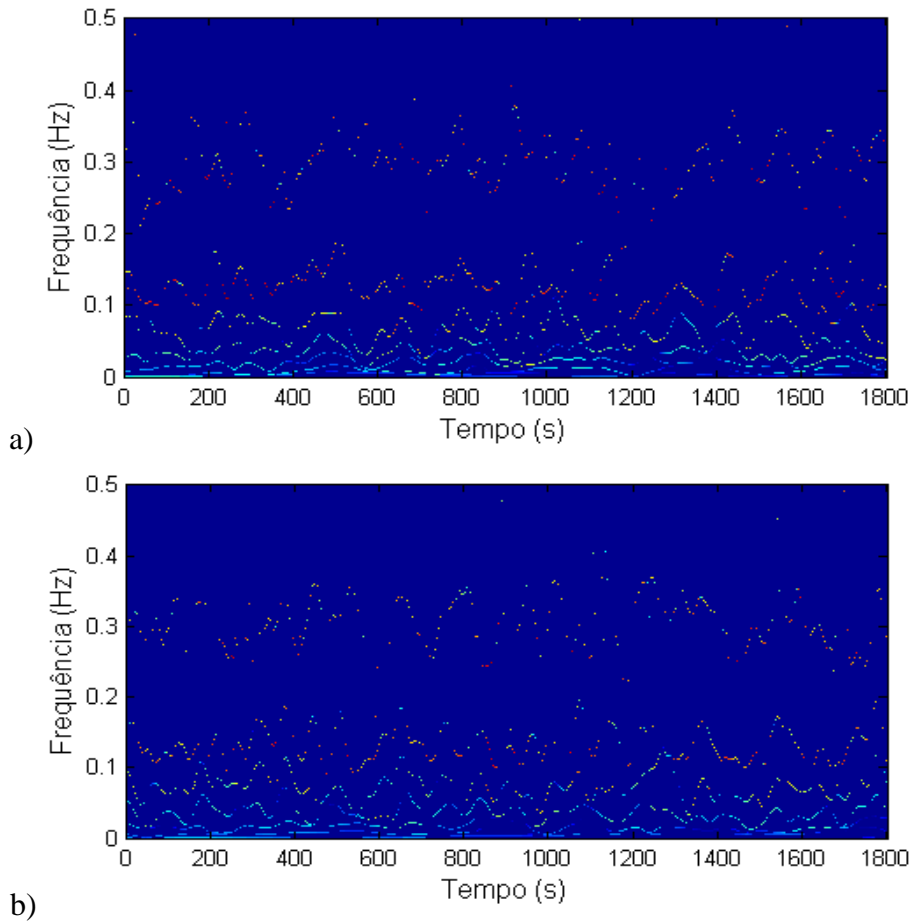


Figura 18: Espectro de Hilbert: a) das 13:00 às 13:30; b) das 13:30 às 14:00.

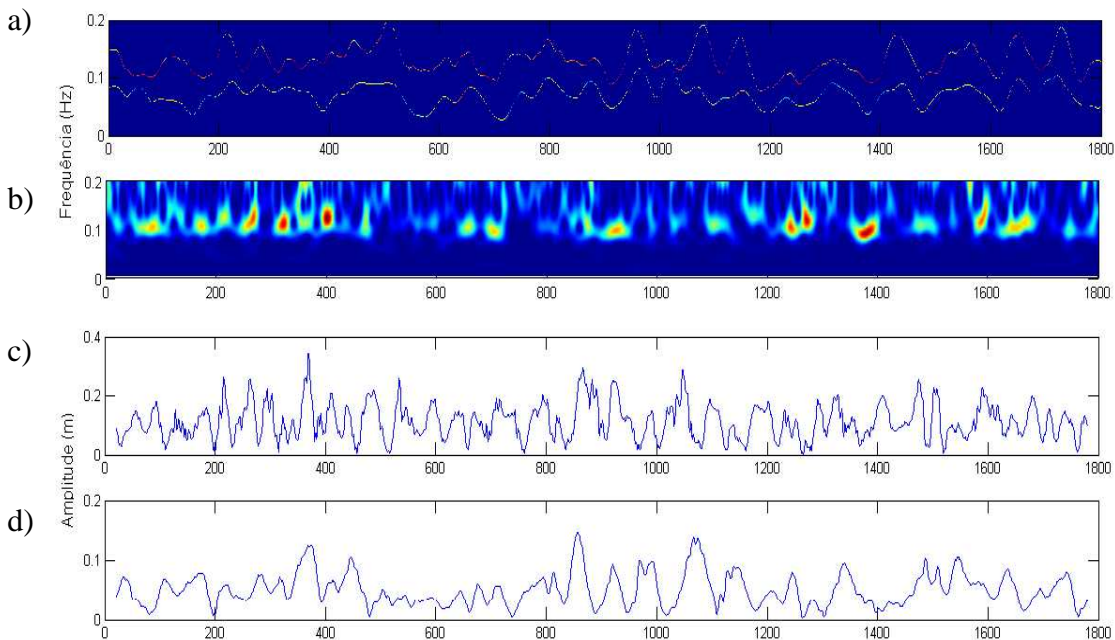
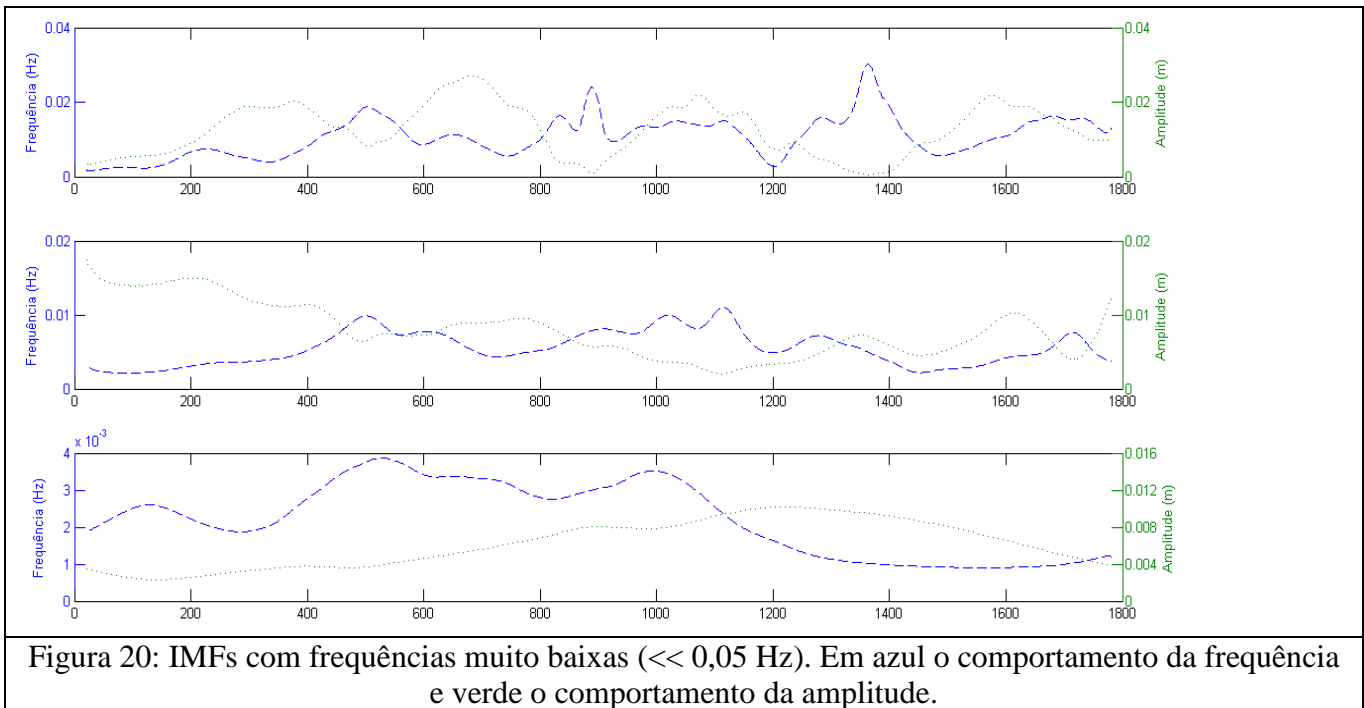


Figura 19: a) Espectro de Hilbert para IMF 2 e IMF 3; b) Wavelet da série temporal. c) Amplitude da IMF 2; d) Amplitude da IMF 3.

Nos espectros de Hilbert apresentados da **Figura 19** fica difícil identificar as componentes de baixa frequência ( $\ll 0,05\text{Hz}$ ) por dois motivos: os valores de frequência são, por si só muito baixos, e as amplitudes dessas componentes são pequenas. No entanto, a **Figura 20** mostra

claramente a presença dessas componentes, onde a linha azul indica a variação de frequência ao longo do tempo e a linha verde a variação de amplitude.



## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentadas três técnicas utilizadas 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 primeiramente a diferentes séries temporais simples, 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. No que se refere à representação de processos não estacionários, ficou demonstrado que o espectro de Fourier não consegue efetuar tal identificação, enquanto que tanto a técnica de Wavelet como a transformada HHT apresentam bons resultados, neste caso. A técnica de Wavelet apresenta um espalhamento da energia ao longo de frequências, o que não ocorre no registo temporal. Nesse sentido, a resposta da HHT é mais precisa, sendo possível identificar facilmente nos espectros de energia todas as frequências presentes na série temporal.

Seguidamente, aplicaram-se as mesmas técnicas aos dados obtidos *in situ* na campanha de campo realizada na praia da Cornélia, Costa da Caparica, de 11 a 14 de Maio, no âmbito do projecto BRISA. Verificou-se que a HHT apresentava os melhores resultados, caracterizando tanto a formação de grupos de ondas, assim como a presença de harmônicos de segunda ordem. Estes processos eram mascarados pelo espectro de Fourier, o que confirma a necessidade de se desenvolverem novas técnicas de análise de registos de ondas, especialmente dentro ou próximo da zona de arrebentação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) o financiamento concedido através dos projectos PTDC/ECM/67411/2006. Este trabalho insere-se no âmbito da cooperação luso-brasileira, através do projecto CAPES/FCT.

## REFERÊNCIAS

1. BARBOSA, A. C. B., BLITZKOW, D., “ Ondaletas: História e Aplicação”. (Apostila) Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo – IAG/USP, 2008.
2. BENDAT, J. S., PIERSOL A. G, Random Data. Analysis and Measurement Procedures. John Wiley & Sons, New York - 2nd Ed, 1986.
3. CARVALHO, M. M., Simulação da Agitação Irregular - Técnicas Matemáticas. Tese para Especialista, LNEC, Lisboa, 1973.
4. HUANG, N. E., SHEN, Z., LONG, S. R., “A new view of nonlinear water waves. The Hilbert spectrum.” Annual Rev. Fluid Mech., v. 31, p. 417–457, 1999.
5. HUANG, N. E., LONG, S. R., SHEN, Z., The mechanism for frequency downshift in nonlinear wave evolution. Adv. Appl. Mech., v. 32, p. 59-111, 1996.
6. HUANG N. E., SHEN Z., LONG, S. R., WU, M. C., SHIH, H. S., ZHENG Q., YEN N., TUNG C. C., LIU H. H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis." Proc. R. Soc. London, v. Ser. A, 454, p. 903-995, 1998.
7. LIU, P. C., Wave grouping characteristics in nearshore Great Lakes I. Ocean Engineering, v. 20, p. 1221-1230, 2000.
8. LIU, P. C., Wave grouping characteristics in nearshore Great Lakes II. Ocean Engineering, v. 29, p. 1415-1425, 2001.
9. RIBEIRO, C. E. P., Uma Nova Técnica Espectral para Análise Direcional de Ondas”. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil., 1999.