

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**ANÁLISES TEMPORAL, ESPECTRAL E DIRECCIONAL DE DADOS DE
AGITAÇÃO MARÍTIMA NO PORTO DE PRAIA DA VITÓRIA**

Rui Capitão¹, Luiz Endres², Conceição Juana Fortes¹, Anabela Simões³

¹ LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, rcapitao@lnec.pt, jfortes@lnec.pt

² IPH - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, Brasil, endres@ufrgs.br

³ LAMTEC, Universidade dos Açores, Praia da Vitória, Portugal, anabela@uac.pt

RESUMO:

Neste artigo descrevem-se as metodologias actualmente empregues no LNEC para o processamento de registos de agitação marítima, funções discretas do tempo representando a elevação da superfície da água, pressão ou outros. Os resultados que se obtêm são as características de agitação marítima apresentadas sob a forma de parâmetros temporais e espectrais: alturas de onda e períodos de onda. É também possível obter as direcções de onda, não como resultados directos da análise temporal e espectral dos registos das elevações, mas como produto da utilização de um método baseado no trabalho de Longuet-Higgins (Dean & Dalrymple, 2000), adaptado para o efeito.

As metodologias referidas foram implementadas no pacote de software SAM, em 3 módulos distintos, dois dos quais realizados para este trabalho, e foram aplicadas a um caso de estudo, Praia da Vitória (ilha Terceira, Açores), local onde foram instalados diversos instrumentos de medição (bóia-ondógrafo, sensores de pressão de fundo, radar), no âmbito dos projectos CLIMAAT, CLIMARCOST e RADMAR. Os resultados, referentes a um período de um mês de dados provenientes da bóia-ondógrafo, de 30 de Novembro de 2009 a 29 de Dezembro de 2009, permitem concluir que as análises temporal e espectral produzem resultados muito idênticos em termos de alturas de onda, apesar de se observarem algumas diferenças no tocante aos períodos, principalmente ao variar o modo como se definem as ondas no campo temporal.

ABSTRACT:

This paper describes the methodologies currently employed at LNEC for processing wave records, i.e. discrete functions of time representing the water surface elevation, pressure or other. Obtained results are the characteristics of waves presented as time and spectral parameters, namely wave heights and wave periods. It is also possible to obtain the wave directions associated with the records, not directly as a result of time and spectral analyses of the records, but indirectly by using a method based on the work of Longuet-Higgins (Dean & Dalrymple, 2000), tailored for this paper.

The above mentioned methodologies were implemented into SAM software package, and applied to a case study, Praia da Vitoria (Terceira island, Azores), where several acquisition instruments (wave buoy, pressure sensors and radar), were installed under projects CLIMAAT, CLIMARCOST and RADMAR. The results, referring to a period of one month of wave-buoy data from November, 30th to December, 29th, enabled one to conclude that both the time and spectral analyses show very identical results in terms of wave heights, although some discrepancies are found in terms of periods, which are mainly due to the way how individual waves are defined in the time domain.

PALAVRAS-CHAVE:

Análise temporal, análise espectral, análise direccional, Praia da Vitória, pacote SAM.

INTRODUÇÃO

A agitação marítima é um dos aspectos determinantes no projecto de obras marítimas, na segurança de infra-estruturas, na navegação e nas operações portuárias.

Os modelos numéricos de escala regional conseguem produzir estimativas de boa qualidade da agitação marítima ao largo de um local onde se pretende conhecer o regime de agitação, as quais podem, mediante modelos de propagação, ser depois transferidas para a costa ou mesmo para o interior de zonas portuárias. No entanto, todo este processo tem de ser validado com dados obtidos in situ de modo a ter confiança nos resultados numéricos. A partir daí, uma vez conhecidas as características da agitação e correntes no interior de um porto, e comparando esses valores com um conjunto de valores-limite que estabelecem as boas condições de segurança e operacionalidade do porto, avalia-se a necessidade ou não de accionar procedimentos de emergência. Desta forma, são identificadas situações de risco, as quais podem originar atempados avisos ou alertas, reduzindo deste modo a ocorrência de situações de emergência nas actividades costeiras ou portuárias.

É, neste âmbito que decorre no LNEC e na Universidade dos Açores um projecto que visa o desenvolvimento de uma ferramenta integrada para apoio à gestão portuária, para o porto de Praia da Vitória. Esta ferramenta deverá ser capaz de prever os efeitos da agitação marítima e das correntes de maré nas infra-estruturas e operações portuárias assim como na navegação. O sistema, chamado MOIA, processa os dados disponíveis (previsões de vento e/ou da agitação marítima, características morfológicas do porto e da área circundante) e recorre a modelos numéricos de propagação de ondas para emitir avisos ou alertas (ex.: via mensagens SMS) às entidades portuárias competentes sempre que a segurança do porto esteja em causa. Indispensável em todo este processo é a validação do sistema de modelos numéricos acoplados desenvolvido no âmbito do projecto, contribuindo para o aperfeiçoamento daquele sistema e estabelecendo a confiança nos seus resultados. Para tal, a existência de dados de agitação marítima em vários locais da zona em estudo, bem como uma correcta análise dos mesmos, é fundamental.

Neste artigo, descrevem-se as metodologias usadas neste sistema para o processamento das características de registos de agitação marítima. Assim, após este capítulo de introdução descrevem-se os procedimentos de análise temporal, espectral e direccional, realizados a partir de registos de elevação da superfície livre provenientes de uma bóia-ondógrafo. Seguidamente, é apresentado o software SAM, em especial os módulos introduzidos para efectuar as análises mencionadas. Finalmente, procede-se à aplicação destes módulos de software aos dados provenientes da bóia-ondógrafo instalada ao largo do porto da Praia da Vitória e tecem-se comentários e conclusões.

ANÁLISE TEMPORAL, ESPECTRAL E DIRECCIONAL DE REGISTOS

Para o tratamento dos registos obtidos (funções discretas do tempo representando a elevação da superfície da água, pressão ou outros) no local de estudo, são empregues a análise temporal e a análise espectral, incluídas no pacote de software SAM (Capitão, 2002 e Endres & Capitão, 2010).

Na análise temporal de um registo começa-se por estabelecer um critério de definição de “onda”, isto é o modo de definição das “oscilações” que se identificam num registo de elevações da superfície da água, $\eta(t)$. A definição de onda é pouco consensual (Goda, 1985). Dos critérios existentes na literatura, há, contudo, um que é incontestavelmente mais usado: trata-se do critério de zero ascendente/descendente, usado na análise temporal feita neste trabalho, que consiste em

identificar a ocorrência de uma onda quando há duas passagens consecutivas da elevação da superfície pelo nível médio (nível “zero”), no sentido ascendente/descendente. Assim, após remover o nível médio do registo de ondas em análise, definindo assim o nível de referência, as ondas do registo são limitadas por estes zeros. Após esta fase, são determinadas as séries de alturas, H , e períodos, T , das ondas que definem o registo $\eta(t)$, e calculam-se, entre outros, a altura significativa, HS , i.e., a média do terço de ondas de altura mais elevada do registo e o período médio, T_{med} , i.e., a média dos períodos de onda do registo.

Para além da descrição no tempo, usa-se frequentemente a análise em frequência ou espectral. A descrição em frequência pode ser concretizada através de análise harmónica ou análise espectral do registo das elevações da superfície livre, $\eta(t)$, através da construção de uma função, $S(f)$, que representa a densidade espectral das ondas em função da frequência. A análise espectral permite apresentar e salientar a informação mais importante presente num sinal temporal $\eta(t)$, revelando 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 (1973) ou Bendat & Piersol (1986). Vários parâmetros espectrais são determinados a partir da informação espectral fornecida pelos momentos do espectro $S(f)$. Estes últimos podem ser posteriormente utilizados para calcular os chamados parâmetros espectrais, de que se destacam a altura significativa, H_{m0} , e o período médio TZ (ou T_{02}).

A estimação da direcção média não pode ser efectuada somente com a informação proveniente dos registos de elevação da superfície livre, como acontece com as análises temporal e espectral acima mencionadas. De acordo com Trageser & Elwany (1990), podem ser usadas diversas técnicas de medição e análise para obtenção dos espectros direccionais. Para cada aplicação, o grau desejado de descrição direccional pode variar desde um completo conjunto de características até uma descrição muito condensada em termos de poucos parâmetros, tal como a direcção da onda predominante, por exemplo. Para muitas aplicações envolvendo a direccionalidade das ondas, a direcção média $\theta(f)$ e a dispersão (*spread*), $spr(f)$, em função da frequência, proporcionam informação suficiente, sendo esta a abordagem desenvolvida neste trabalho.

Para obter o espectro de onda direccional, pode ser usado um método desenvolvido por Longuet-Higgins (Dean & Dalrymple, 2000) que considera, para além do referido registo de elevações (ou pressões), também os registos, simultâneos, das velocidades no plano horizontal das partículas da água. Neste método, o espectro direccional é expresso como uma série de Fourier.

Conforme apresentado por Trageser & Elwany (1990), esta série de Fourier, que representa a função de dispersão (*spreading*) direccional, $D(\theta)$, tem a forma

$$D(\theta) = \frac{1}{2} \pi + \sum_n [A_n \cos(n\theta) + B_n \sin(n\theta)] / \pi \quad [1]$$

Trabalhando, por exemplo, com medições de pressão (p) e velocidades de corrente (u, v), podem ser obtidas as estimativas dos quatro coeficientes de Fourier, A_1, B_1, A_2 e B_2 , através das expressões

$$A_1 = \frac{C_{pv}}{[C_{pp}(C_{uu} + C_{vv})]^{1/2}} \quad [2]$$

$$B_1 = \frac{C_{pu}}{[C_{pp}(C_{uu} + C_{vv})]^{1/2}} \quad [3]$$

$$A_2 = \frac{C_{vv} - C_{uu}}{C_{vv} + C_{uu}} \quad [4]$$

$$B_2 = \frac{C_{vu}}{C_{vv} - C_{uu}} \quad [5]$$

onde C representa a parte real do espectro (co-spectrum), p é a pressão, u é a velocidade na direcção Norte e v é a velocidade na direcção Este. A direcção média da onda $\theta(f)$ e a dispersão direccional (spread) $s(f)$ podem ser calculados através de

$$\theta(f) = \arctan\left(\frac{A_1}{B_1}\right) \quad [6]$$

e

$$s(f) = [2(1-r)]^{1/2}, \quad r^2 = A_1^2 + B_1^2 \quad [7]$$

Segundo os mesmos autores, a direcção média de onda estimada $\theta(f)$ é exacta. Porém, a estimativa do valor da dispersão direccional pode ser grosseira para um número de coeficientes limitado.

A FERRAMENTA SAM

Estrutura geral

O pacote SAM é um pacote de software com utilização em canais ou tanques de ondas irregulares de laboratórios de hidráulica marítima. Destina-se à caracterização, simulação, geração e aquisição da agitação marítima e, actualmente, é constituído por nove módulos principais, interligados, respeitantes às diversas fases seguidas num ensaio típico:

- Módulo 1 – SAM MOD 1 (Simulação Numérica), com três sub-módulos;
- Módulo 2 – SAM MOD 2 (Simulação, Geração e Aquisição), com dois sub-módulos;
- Módulo 3 – SAM MOD 3 (Calibração de Sondas);
- Módulo 4 – SAM MOD 4 (Controlo do Batedor);
- Módulo 5 – SAM MOD 5 (Análise da Reflexão);
- Módulo 6 – SAM MOD 6 (Análise Temporal);
- Módulo 7 – SAM MOD 7 (Análise Espectral);
- Módulo 8 – SAM MOD 8 (Análise Direccional);
- Módulo 9 – SAM MOD 9 (Utilidades), com quatro sub-módulos.

Estes nove módulos tratam extensivamente vários aspectos de simulação de agitação marítima, quer numérica, quer em modelo físico. Cada módulo ou sub-módulo apresenta-se ao utilizador por intermédio de uma janela de interface, chamada neste trabalho de painel-janela ou simplesmente painel. Os módulos 6 a 8, de análise temporal, espectral e direccional, são descritos de seguida.

Módulo Análise Temporal (SAM MOD 6)

No módulo SAM MOD 6 (Análise Temporal), é realizada análise temporal de séries temporais de registos das elevações da superfície livre. Obtêm-se, para cada registo, os valores de Hmax (altura máxima), HS (altura significativa), Hmed (altura média), TS (período significativo) e Tmed (período médio), entre outros.

Este módulo permite a utilização de vários critérios de definição de onda, tais como o critério de zero ascendente, de zero descendente, com uso de 2 a 4 pontos de resolução, etc. Possibilita também a escolha, pelo utilizador, de dois tipos de pré-tratamento de dados de modo a calcular o nível médio de referência: subtração da média móvel ou subtração de polinómio.

A Figura 1 mostra um exemplo da utilização deste módulo. Nesta figura é ilustrada a obtenção dos parâmetros de análise temporal para um sinal $\eta(t)$, elevação da superfície livre, simulado numericamente.

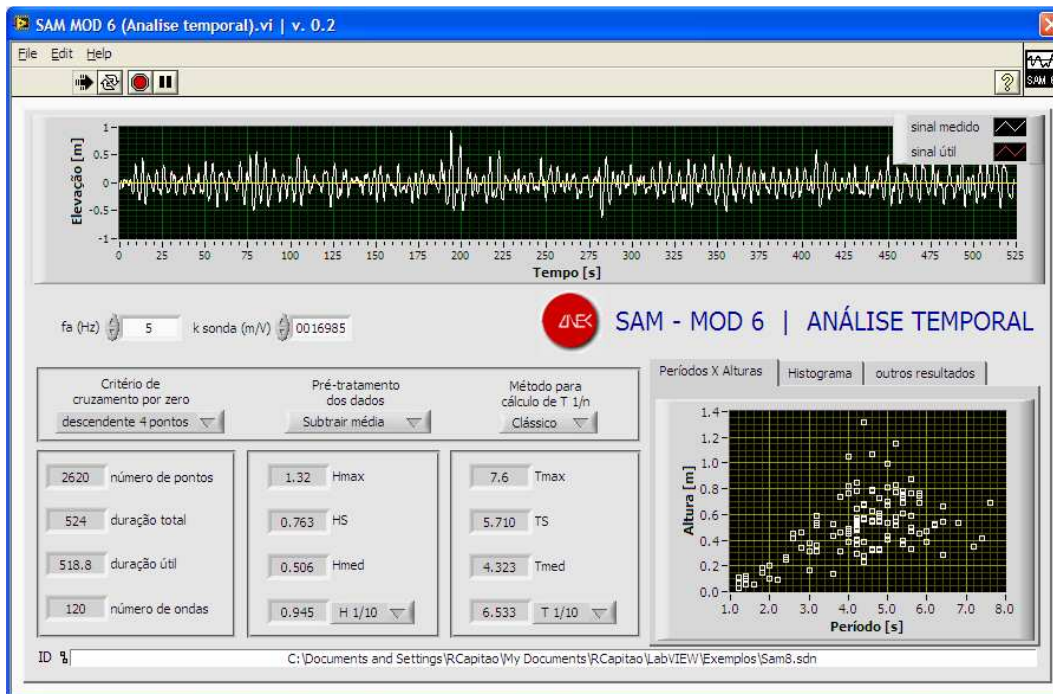


Figura 1.- Módulo SAM MOD 6 (Análise Temporal)

Este módulo, se for usado isoladamente, fornece um ficheiro com uma tabela de parâmetros. Caso se considere um conjunto de registos, será fornecida uma tabela de parâmetros referente a cada um dos registos do conjunto.

Salientam-se alguns dos parâmetros mais importantes, necessários à utilização deste módulo:

- **Nome do ficheiro.** Os registos podem ser fornecidos sob a forma de colunas de valores.
- **fa, frequência de aquisição, em Hz.** Inverso do intervalo (Δt) de tempo, em segundos, entre dois valores consecutivos da elevação contida no registo.
- **k, constante da sonda, em m/V.** Constante do canal adquirido, que pode ser, se este for originário do canal, a característica da sonda, obtida no processo de calibração da sonda. Por omissão, $k=1$.

- **Critério de cruzamento por zero.** Dado existirem na literatura vários critérios para a definição da onda individual, previram-se aqui os mais comuns. Por omissão, usa-se o critério de zero descendente, com 4 pontos de resolução;
- **Escolha do tipo de pré-tratamento de dados.** O pré-tratamento dos dados no registo inicial pode subtrair deste: (1) a média do registo inicial, usado nos casos de registos estacionários, ou (2) uma polinomial de 5ª ordem ajustada aos valores iniciais, empregue nos casos em que o efeito da componente da maré sobre o registo é significativo.
- **Método para cálculo de T 1/n.** O método de cálculo da média dos 1/n maiores valores dos períodos pode ser seleccionado entre:
 1. **Clássico**, utilizado no programa ANOIAGI geralmente usado no LNEC: método em que os períodos são ordenados por valor decrescente e é calculada a média dos 1/n maiores valores, sem consideração das alturas correspondentes a estes períodos; e
 2. **IAHR**, em referência à "List of sea state parameters" (IAHR, 1989): método em que são utilizados os valores dos períodos correspondentes às 1/n maiores alturas de ondas seleccionadas em ordem decrescente.

Este módulo produz um conjunto de resultados de que destacam os seguintes:

- **Gráficos:** dos sinais inicial (medido) e final (útil); de dispersão "Altura de onda vs. Período de onda"; histograma;
- **Diversas estatísticas do registo inicial:** nº de pontos, duração total, duração útil e nº de ondas;
- **Principais parâmetros temporais das alturas de onda do registo:** Altura máxima (Hmax), Altura significativa (HS), Altura média (Hmed) e diversas alturas calculadas para um percentil específico (H1/N);
- **Principais parâmetros temporais dos períodos do registo:** Período máximo (Tmax), Período significativo (TS), Período médio (Tmed) e diversos períodos calculados para um percentil específico (T1/N);

Para os cálculos efectuados neste trabalho, usou-se também o programa REGISTOS, Fortes e Capitão (2009), de modo a confirmar e validar resultados obtidos com este novo módulo.

Módulo Análise Espectral (SAM MOD 7)

A análise dos registos pode, porém, ser efectuada espectralmente. No módulo SAM MOD 7 (Análise Espectral), é realizada análise espectral de séries temporais de registo das elevações da superfície livre. Assim, é calculada a densidade de energia associada a cada uma das frequências correspondendo ao espectro de energia das ondas e, com base neste, obtêm-se os valores da altura significativa, Hm0 (equivalente espectral de HS), TZ (período médio, equivalente a Tmed) e TP (período de pico do espectro, aproximadamente equiparável a TS).

A Figura 2 mostra um exemplo da utilização deste módulo. Nesta figura é ilustrada a obtenção dos parâmetros de análise espectral para o mesmo sinal $\eta(t)$, elevação da superfície livre, simulado numericamente para a análise temporal mostrada na última secção.

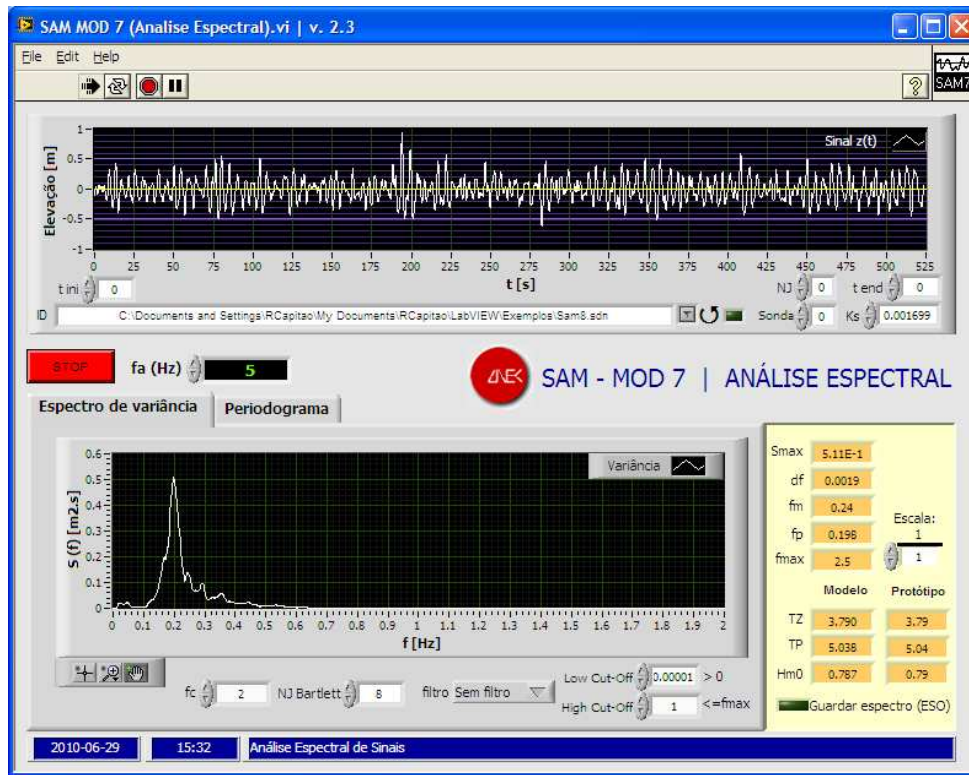


Figura 2.- Módulo SAM MOD 7 (Análise Espectral).

Salientam-se alguns dos parâmetros mais importantes, necessários à utilização deste módulo:

- **Nome do ficheiro.** Os registos podem ser fornecidos sob a forma de colunas de valores.
- **fa, frequência de aquisição, em Hz.** Inverso do intervalo (Δt) de tempo, em segundos, entre dois valores consecutivos da elevação contidos no registo.
- **k, constante da sonda, em m/V.** Constante do canal adquirido, que pode ser, se este for originário do canal, a característica da sonda, obtida no processo de calibração desta. Por omissão, $k=1$.
- **Tipo de filtro usado na remoção de componentes espúrias do sinal.** Previram-se aqui os filtros mais comuns. Por omissão, não é aplicado filtro aos dados;
- **Frequências (mínima e máxima) de corte do espectro.**

Este módulo produz um conjunto de resultados de que destacam os seguintes:

- **Gráficos:** do sinal inicial e do respectivo espectro de variância e o correspondente periodograma;
- **Diversas estatísticas do espectro de variância:** ordenada máxima (S_{max}), intervalo entre frequências (df), frequência mediana (f_m), frequência de pico (f_p) e frequência máxima (f_{max});
- **Principal parâmetro espectral das alturas de onda do registo:** Altura significativa (H_{m0}), equivalente espectral de HS;
- **Principais parâmetros espectrais dos períodos de onda do registo:** Período médio (TZ), e período de pico (TP), equiparável espectral de TS;

Módulo Análise Direccional (SAM MOD 8)

No módulo SAM MOD 8 (Análise Direccional), é realizada análise direccional de séries temporais de registos das elevações da superfície livre e das componentes da velocidade do escoamento no plano horizontal, obtidas simultaneamente em uma determinada posição. Obtêm-se, para cada

registo do conjunto das elevações e das componentes da velocidade, os valores de TP (período de pico do espectro), os ângulos referentes à direcção média e à dispersão direccional (“spread”) da onda.

Este módulo permite a utilização de vários tipos de janela espectral e tamanhos de intervalos a serem empregues na estimativa de espectros dos registos, directamente utilizados na aplicação do método.

A Figura 3 mostra um exemplo da utilização deste módulo. Nesta figura é ilustrada a obtenção dos parâmetros de análise direccional para sinais medidos simultaneamente, de $\eta(t)$, $V_x(t)$ e $V_y(t)$, elevação da superfície livre e componentes da velocidade do escoamento nas direcções “x” e “y” do plano horizontal, respectivamente, simulado numericamente.

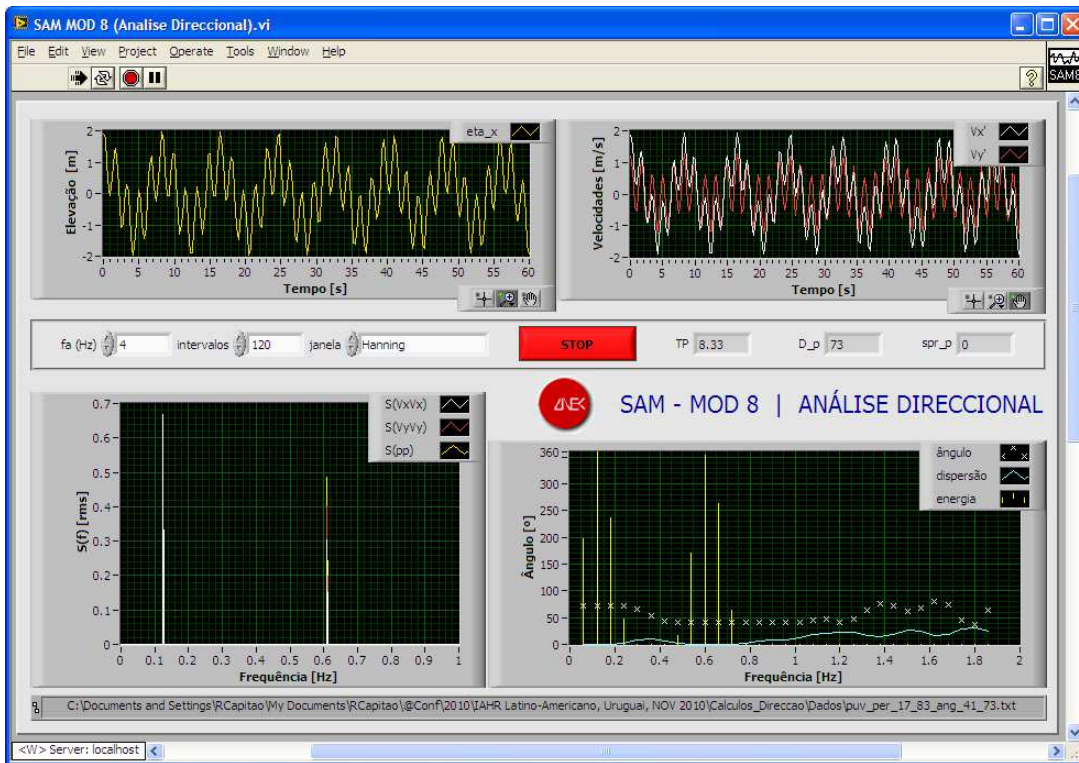


Figura 3.- Módulo SAM MOD 8 (Análise Direccional)

Salientam-se alguns dos parâmetros mais importantes, necessários à utilização deste módulo:

- **Nome do ficheiro.** Os registos podem ser fornecidos sob a forma de colunas de valores.
- **fa, frequência de aquisição, em Hz.** Inverso do intervalo (Δt) de tempo, em segundos, entre dois valores consecutivos da elevação e das componentes da velocidade contidas no registo.
- **Número de intervalos em que o registo inicial será subdividido.** Subdivisão efectuada para obter o “alisamento” das estimativas dos espectros de energia utilizados no cálculo dos ângulos. Por omissão, o registo inicial não é subdividido; e
- **Tipo de janela espectral utilizada no cálculo dos espectros.** Por omissão é utilizada a janela espectral de Hanning.

Este módulo produz um conjunto de resultados de que se destacam os seguintes:

- **Gráficos:** dos sinais iniciais referentes à elevação, segundo z, e velocidades, segundo x e y, dos respectivos espectros, dos ângulos referentes à direcção média da onda e à dispersão direccional;

- **Parâmetro espectral principal dos períodos de onda do registo de elevação:** Período de pico (TP); e
- **Parâmetros direccionais principais relativos ao período de pico do registo de elevação:** Ângulo referente à direcção média da onda (D_p) e ao correspondente valor da dispersão direccionial (spr_p).

APLICAÇÕES

Pretende-se nesta secção aplicar as metodologias de análise temporal, espectral e direccionial, descritos na secção anterior, a dados de agitação marítima provenientes de um caso de estudo, Praia da Vitória (Terceira, Açores), local onde foram instalados diversos instrumentos de medição (bóia ondógrafo, sensores de pressão de fundo, radar), no âmbito dos projectos CLIMAAT, Simões (2006) e RADMAR, Simões et al. (2010). No presente trabalho, apenas se utilizaram os dados provenientes da bóia-ondógrafo.

Após uma descrição da zona em estudo, segue-se a metodologia empregue, a apresentação dos resultados da análise temporal, espectral e direccionial e a sua discussão.

Zona de estudo

O caso em estudo – o porto de Praia da Vitória, Figura 4, situa-se na costa Este da ilha Terceira, no arquipélago dos Açores, Portugal. Os dois molhes que protegem o porto definem uma bacia portuária de formato aproximadamente rectangular com cerca de 1 km x 2 km.



Figura 4.- Arquipélago dos Açores, Terceira, porto de Praia da Vitória

No âmbito do projecto CLIMAAT, Simões (2006), foi instalada: a) uma bóia-ondógrafo direccionial a pouco mais de 4 km a nordeste do porto, numa zona com profundidade de 90 m; b) dois marégrafos (sensores de pressão), um na marina e outro junto ao radar, na ponta do molhe do porto comercial; c) um radar, que mede os parâmetros à entrada do porto, junto ao molhe Sul. A localização dos instrumentos de medição pode ser consultada na Figura 5.

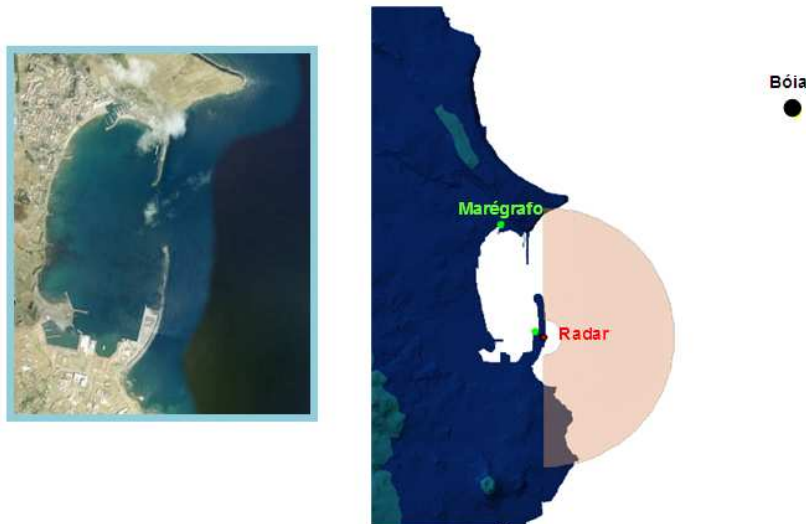


Figura 5.- Instrumentos de medição no porto da Praia da Vitória. Radar, a vermelho; bóia, a preto; marégrafos, a verde. A semi-circunferência representa a área de varrimento do radar.

Metodologia

O tratamento dos registos da bóia-ondógrafo envolveu o seguinte conjunto de procedimentos:

- Obtenção de registos, $\eta(t)$, determinados a partir dos sinais originais, representativos de estados de mar estacionários, com a duração de 30 minutos;
- Análise temporal dos registos com o módulo 6 do programa SAM e o programa REGISTOS, Fortes e Capitão (2009), para confirmar e validar resultados. Obtiveram-se, para cada registo, os valores de HS e Tmed, entre outros.
- Análise espectral dos registos com o módulo 7 do programa SAM (Capitão, 2002). Com base no espectro, e nos seus momentos de ordem zero e dois, extraíram-se os valores da altura significativa, Hm0 (equivalente espectral de HS) e TZ (período médio, equivalente a Tmed), entre outros;
- Análise direccional dos registos, com o módulo 8 do programa SAM.

RESULTADOS

Os registos da bóia-ondógrafo correspondem aos valores da elevação da superfície livre, $\eta(t)$, obtidos durante o mês de Dezembro de 2009, para a bóia-ondógrafo direccional localizada a cerca de 4 km a nordeste do porto. Estes registos, com a duração de 30 minutos, foram recolhidos de 3 em 3 horas (ver excerto de um destes registos na Figura 6).

Com base nesses registos e após aplicação dos módulos 6 a 8 do SAM a cada um deles, obtiveram-se os valores da altura significativa HS e do período médio Tmed, para a análise temporal, e os correspondentes parâmetros da análise espectral: Hm0 (equivalente espectral de HS) e TZ (período médio, equivalente a Tmed). Associados a estes parâmetros, foram calculados os respectivos valores da direcção, D_p e spr_p .

Estes resultados permitiram realizar comparações entre parâmetros equivalentes de ondas: HS vs. Hm0, Tmed vs. TZ e TS vs. TP, ver Figura 7, Figura 8, Figura 9 e Figura 10.

Para além destas análises, efectuou-se também uma análise direccional dos registos considerando os três deslocamentos extraídos da bóia-ondógrafo e aplicando o módulo 8 do SAM. Mais à frente, na Figura 11, apresentam-se estes resultados da aplicação do método de cálculo das direcções médias.

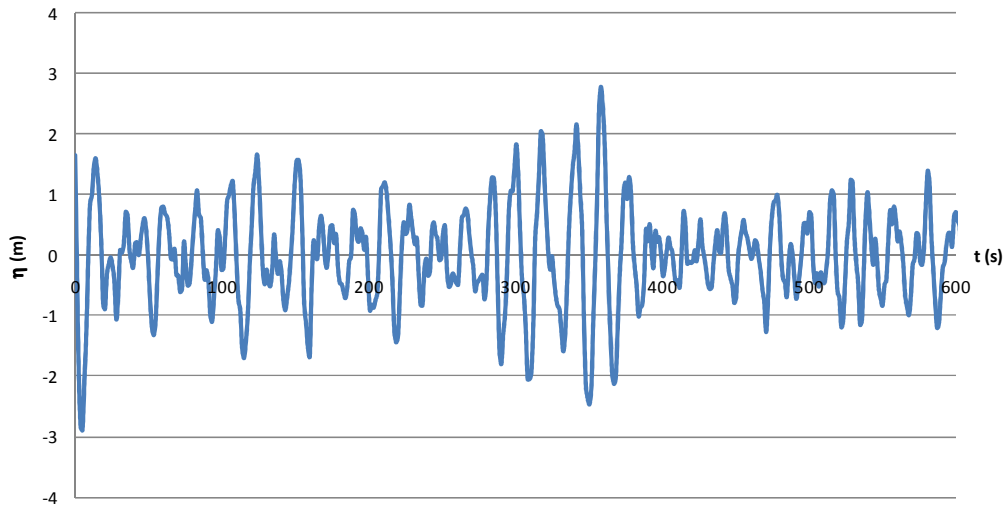


Figura 6.- Excerto do primeiro terço de um registo de 30 minutos das elevações η (t) da superfície livre na bóia-ondógrafo, em 15-12-2009.

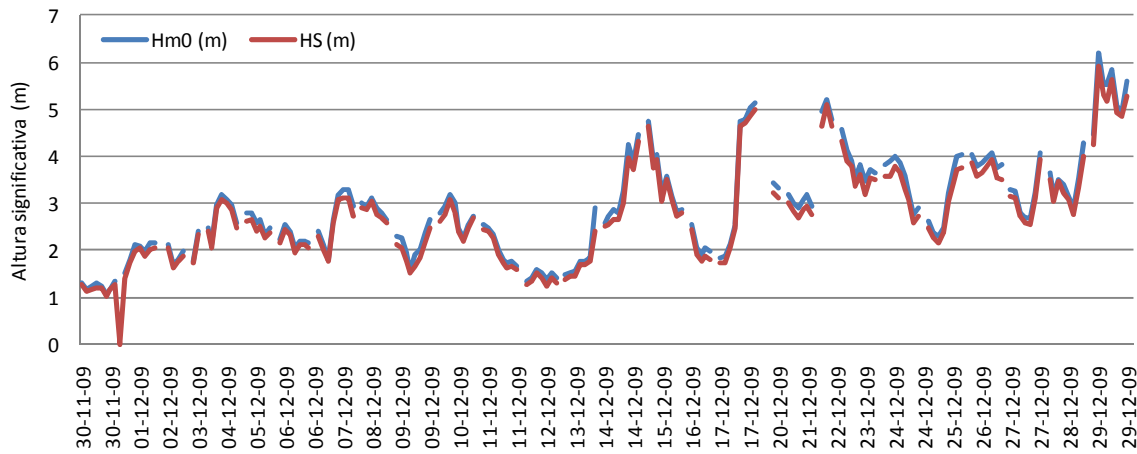


Figura 7.- Comparação dos valores de altura de onda significativa (Hm0 e HS) obtidos nas análises espectral e temporal.

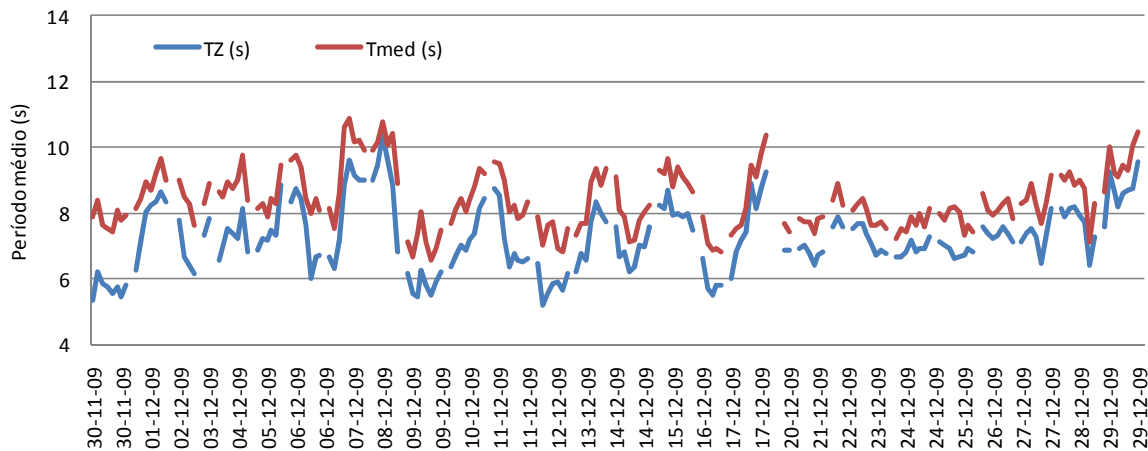


Figura 8.- Comparação dos valores de período médio (TZ e Tmed) obtidos nas análises espectral e temporal.

Da observação da Figura 8, verifica-se existirem algumas diferenças nos períodos médios (T_{med} vs. TZ). Efectivamente, com a análise espectral obtiveram-se valores de período médio significativamente mais baixos do que para a análise temporal. A razão para esta diferença reside na fórmula de cálculo usada no método espectral, que, implicitamente (através dos momentos de ordem zero e dois do espectro), considera todas as ondas existentes no registo, por mais pequenas que sejam, ao passo que o método directo, empregue na análise temporal, considera apenas ondas que cruzam o nível médio, não considerando portanto as pequenas oscilações, que ocorrendo acima ou abaixo desse nível, não o cruzam. O método de detecção do início de uma nova onda, usado neste trabalho, considera um mínimo de dois instantes acima do zero, quando o instante anterior está abaixo desse nível. Isto faz com que ondas muito pequenas sejam rejeitadas, o que leva a que, como se disse, a média dos períodos aumente ao longo do registo.

Se, no entanto, se utilizar como critério de início de nova onda a ocorrência de apenas um instante acima do zero, quando o instante anterior está abaixo desse nível, já os valores de período médio, aqui designado por T_{med}^* , se aproximam muito mais dos valores de TZ , como se pode ver na Figura 9, a seguir.

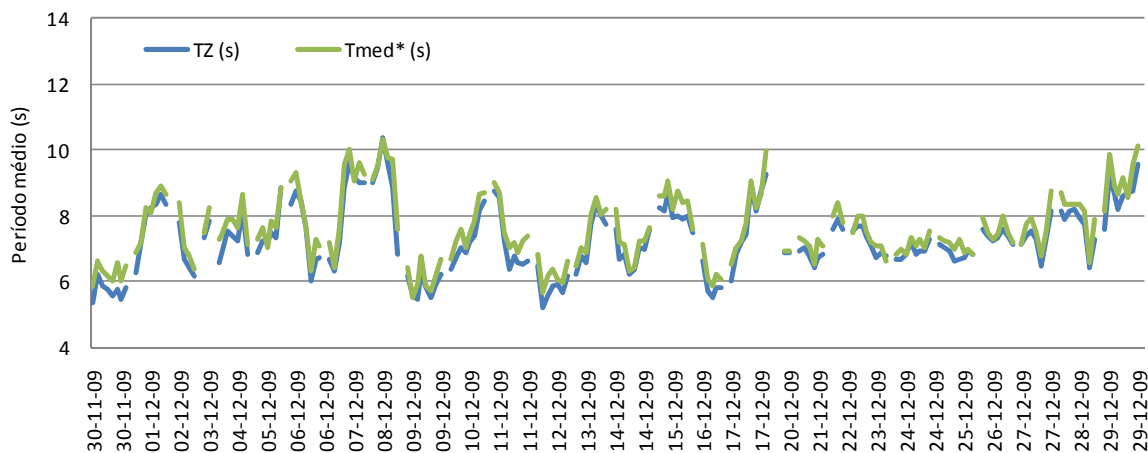


Figura 9.- Comparação dos valores de período médio de zero ascendente (TZ e T_{med}^*) obtidos nas análises espectral e temporal.

Foram também comparados os valores obtidos para os períodos de maior energia, calculados segundo as duas habituais análises: o período de pico do espectro de energia, TP , para a análise espectral, e o período significativo, TS , para a análise temporal.

Como anteriormente, observam-se também algumas diferenças entre estes períodos (TP vs. TS), como se pode ver na Figura 10. Neste caso, porém, as diferenças observadas são no sentido contrário, i.e., a análise espectral apresenta valores de período de pico mais altas do que de período significativo, para a análise temporal. A razão para esta diferença é também distinta da anteriormente referida e radica tão simplesmente no facto de esta comparação não ser muito lícita dado que TP e TS não são totalmente comparáveis, embora haja uma correlação muito forte entre ambos. Assim, neste caso, optou-se por mostrar esta comparação mas apenas para verificar que o andamento geral de ambos os parâmetros é bastante idêntico.

Claramente, TP é um parâmetro bem mais instável do que TS , dado que o primeiro é proveniente de um único valor do pico do espectro ao passo que o segundo resulta do cálculo de uma média de valores de período (períodos de onda associados ao terço de ondas de altura mais elevada do registo). No entanto, em termos de andamento geral, a concordância é razoável.

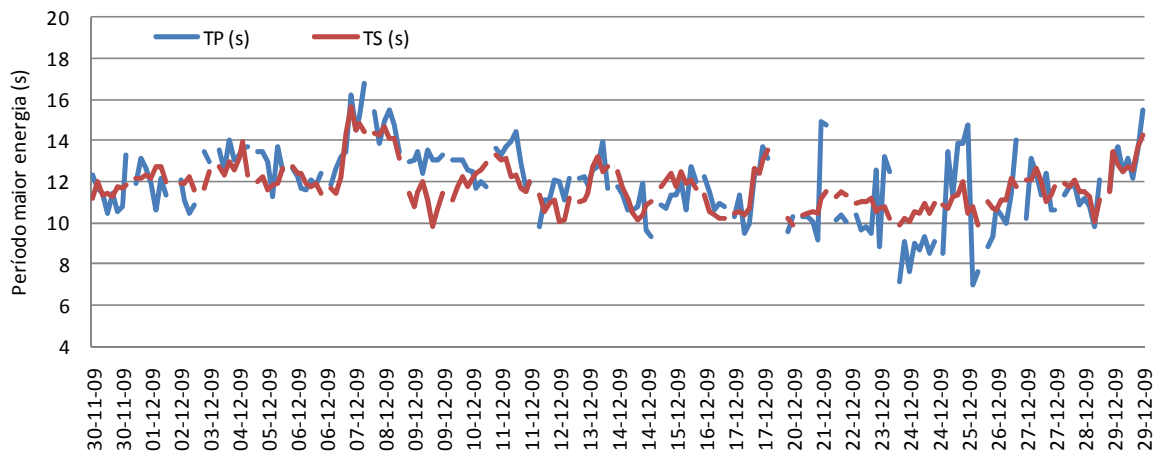


Figura 10.- Comparação dos valores de período de pico (TP) e significativo (TS) obtidos nas análises espectral e temporal.

Na Figura 11 apresentam-se as frequências relativas (%) dos valores da direcção, D_p , associados aos registos considerados neste trabalho, provenientes do módulo 8 do SAM. Foi verificada a exactidão do método utilizado no cálculo das direcções com base nas séries temporais das elevações e respectivas velocidades segundo o plano x-y, através de um conjunto alargado de simulações numéricas.

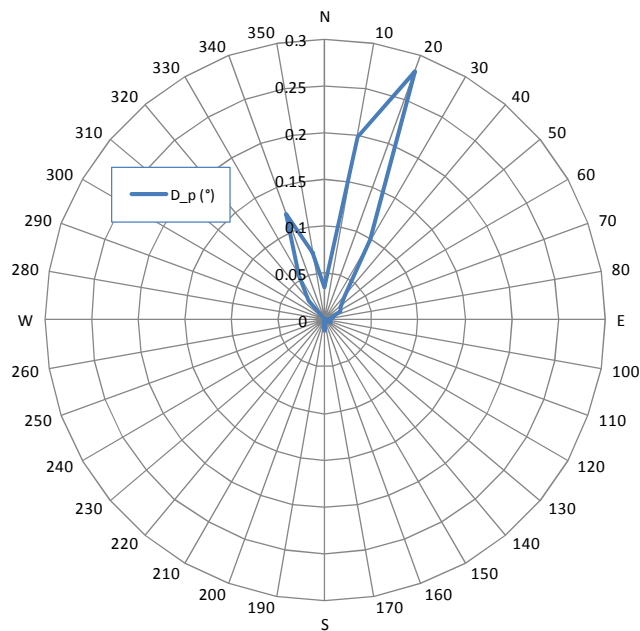


Figura 11.- Frequências relativas (em %) dos valores da direcção, D_p

CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram efectuadas as análises temporal, espectral e direccional de registos com o pacote de software SAM, referentes a um conjunto de dados de medições efectuadas na bóia-ondógrafo instalada ao largo do porto da Praia da Vitória, Açores. Este tipo de estudo é fundamental para a utilização generalizada do pacote de software SAM agora totalmente apetrechado com estes métodos de análise de registos.

Com base nestes primeiros estudos preliminares, pode-se concluir que, para o cálculo das alturas de onda, qualquer das análises efectuadas pode ser utilizada. Relativamente aos períodos, e mais concretamente à comparação entre TZ e Tmed, verificou-se que a concordância dos dois parâmetros depende fortemente do modo como é definido o critério de início de nova onda. Assim, caso se considere o início da onda considerando apenas um instante acima do zero, quando o instante anterior está abaixo desse nível, a concordância entre estas variáveis é boa. Em relação aos períodos de pico e significativo, as diferenças são mais expressivas. Tal deve-se ao facto de o primeiro ser proveniente de um único valor do pico do espectro e o segundo resultar do cálculo de uma média de valores de período (períodos de onda associados ao terço de ondas de altura mais elevada do registo).

Quanto ao cálculo das direcções com base nas séries temporais das elevações, e respectivas velocidades segundo o plano x-y, verificou-se a sua exactidão nas simulações numéricas efectuadas.

O facto de o software SAM estar agora equipado com os três tipos de análise (temporal, espectral e direccional), resulta em uma maior capacidade e rapidez em resolver problemas de análise da agitação marítima comuns em trabalhos de hidráulica marítima. Em particular, o projecto que actualmente decorre no LNEC e na Universidade dos Açores, de desenvolvimento de uma ferramenta integrada para apoio à gestão portuária, para o porto de Praia da Vitória, fará uso imediato das ferramentas desenvolvidas neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Dr. Theo Moura pela ajuda prestada na implementação e testes do método de análise direccional. Agradecem também o financiamento da FCT através do projecto PTDC/ECM/73145/2006 assim como o financiamento do projecto de pós-doutoramento FCT/CAPES/Proc. 4.4.1.00.

REFERÊNCIAS

- Bendat, J. S. and A. G. Piersol** (1986). *Random Data. Analysis and Measurement Procedures*. John Wiley & Sons, New York - 2nd Ed.
- Carvalho, M. M.** (1973). *Simulação da Agitação Irregular - Técnicas Matemáticas*. Tese para Especialista, LNEC, Lisboa.
- Capitão, R.** (2002). *Modelação estocástica numérica e física da agitação marítima*. Tese de doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Dean, R. G. and R. A. Dalrymple** (1993). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. World Scientific, Singapore.
- Endres, L. e R. Capitão** (2010). "A comparison of time and spectral analyses on physical simulations of wave records in flume", *Proceedings of CoastLab 2010*, Barcelona.
- Fortes, C.J. e R. Capitão** (2009). "Programas PRE-REGISTOS e REGISTOS". *Relatório técnico no. 01/2009*. LNEC, Lisboa.
- Goda, Y.** (1985). *Random Seas and Design of Maritime Structures*. University of Tokyo Press, Japan.
- IAHR (1989)** – "List of Sea-State Parameters". *IAHR Working Group*. JWPCOE, vol. 115, no. 6, 793-808.
- Simões, A.** (2006). *Processamento de Dados de Agitação Marítima – Bóias Ondógrafo nos Açores*, Relatório Interno, Universidade dos Açores.
- Simões, A., M. Juliano and E. Barcelos** (2010). *Evaluation of wave power potential in the Azores Region*. Green Islands Project workshop, Angra do Heroísmo, May 2010.
- Trageser, J.H., H. Elwany** (1990). *The S4DW, an integrated solution to directional wave measurements*. Proc. IEEE Working Conf. on Current Measurement, pp. 1-14