



VERIFICAÇÃO DE UM SISTEMA DE ABSORÇÃO DINÂMICA DE REFLEXÕES INSTALADO NO CANAL DE ONDAS IRREGULARES DO LNEC

R. Capitão¹, M. Vicente²

¹ Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa

² Instituto de Sistemas e Robótica, Instituto Superior Técnico, Avenida Rovisco Pais, Lisboa
rcapitao@lneec.pt, mvicente@isr.ist.utl.pt

RESUMO

Neste artigo apresenta-se a descrição e a verificação de um sistema da absorção dinâmica de ondas reflectidas instalado no canal de ondas irregulares COI1 do LNEC. Este sistema foi embebido no pacote informático SAM, já existente, destinado à simulação, geração e aquisição de agitação em canais e tanques de ondas.

Começa-se por descrever o problema a resolver, isto é, como absorver as re0-reflexões indesejáveis presentes nos canais de ondas, e apresentam-se os fundamentos teóricos dos sistemas existentes de absorção activa 2D, as suas vantagens e os seus inconvenientes. Descrevem-se também, neste contexto, alguns dos sensores hidrodinâmicos utilizados em sistemas de absorção activa e referem-se algumas vantagens e inconvenientes associados aos seus modos de aplicação e funcionamento.

A seguir, apresenta-se sucintamente o princípio de funcionamento do sistema de absorção activa 2D AWASYS (acrónimo de Active Wave Absorption SYStem), recentemente implementado como módulo do pacote SAM. São apresentados a teoria subjacente que conduz à resolução do problema da absorção dinâmica das reflexões e os procedimentos práticos de implementação do sistema no canal COI1 do LNEC e são fornecidas algumas indicações gerais da forma como se pode realizar (embora com limitações) a adaptação deste sistema a outras condições experimentais.

Finalmente, procede-se a um conjunto de verificações, mediante a realização de ensaios físicos, com o sistema AWASYS ligado e desligado, com vista à validação do sistema para as condições particulares do canal COI1.

Palavras-chave – Sistema de absorção activa, ensaios em modelo físico, reflexão.

1. INTRODUÇÃO

A realização de ensaios em modelo físico, com coeficientes de reflexão variáveis, em canais de ondas, regulares ou irregulares, requer, em termos gerais, a adopção de uma teoria de geração de ondas e outra de absorção de ondas. Efectivamente, dado que normalmente a finalidade dos ensaios é apurar o impacto (ou as suas consequências) das ondas nos modelos em estudo, e criando aquelas inevitavelmente ondas reflectidas pelos modelos, é importante capacitar o sistema com um mecanismo que as absorva (sistema de absorção) para não serem “re-reflectidas” pelo mecanismo de geração (batedor).

Os sistemas de absorção de ondas podem ser de dois tipos: activo (dinâmico) e passivo. O primeiro gera ondas como reacção às ondas reflectidas detectadas; o segundo, simplesmente amortece as ondas, geralmente por intermédio de equipamentos de dissipação de energia.



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

Nesta comunicação, apresenta-se um sistema da absorção de ondas, de nome AWASYS, do tipo dinâmico, compatível com a utilização de batedores de ondas. Este sistema, adquirido em “código-fonte” (LabVIEW) à Universidade de Gent, Bélgica, foi embebido no pacote de simulação, geração e aquisição, SAM, e implementado no canal de ondas irregulares COI1 do LNEC. O livre acesso ao código-fonte permite identificar eventuais problemas existentes ou afinar parâmetros de forma a melhorar os resultados.

2. ASPECTOS TEÓRICOS

A separação de um trem de ondas irregulares em ondas incidentes, propagando-se na direcção do modelo a ensaiar, e em ondas reflectidas, propagando-se na direcção oposta (i.e., na direcção do batedor de ondas), é de grande interesse nos laboratórios de hidráulica. Esta separação, que pode ser realizada nos domínios da frequência ou do tempo, é necessária pelo facto de os ensaios em modelo físico terem geralmente como objectivo o estudo do impacto das ondas incidentes sobre o modelo ao longo do tempo. Quanto melhor for a separação das ondas incidentes das ondas reflectidas, mais fiáveis serão os resultados obtidos.

Os diversos métodos de separação de ondas 2D podem ser realizados nos domínios da frequência ou do tempo. Goda e Suzuki (1976) apresentaram um método no domínio da frequência para estimar as ondas irregulares, incidente e reflectida, de uma onda aleatória, num canal de fundo horizontal. Mansard e Funke (1980), melhoraram este método usando uma técnica de mínimos quadrados. Frigaard e Brorsen (1995) apresentaram um método no domínio do tempo para o mesmo problema.

A realização de ensaios em modelo físico, com factores de reflexão diversos, em canais de ondas, requer, em termos gerais, uma teoria de geração de ondas e outra de absorção. Desde a última década do século XX que a absorção activa em canais de água tem vindo a ser aplicada em diversos laboratórios de hidráulica, nomeadamente no *Danish Hydraulics Institute (DHI)*, Dinamarca, no *Canadian Research Center*, Canadá, e no *Wallingford Research*, Reino-Unido. Os primeiros sistemas de absorção activa caracterizavam-se pelo uso de filtros analógicos ajustados de uma forma mais ou menos *ad-hoc* para obter o sinal de controlo de absorção activa. Desde então, deu-se início a um desenvolvimento dos sistemas de absorção mais rigoroso para procurar clarificar e generalizar toda a teoria subjacente.

A absorção activa de ondas num canal requer a existência de um gerador de ondas, *feedback* hidrodinâmico e um sistema de controlo de absorção. O *feedback* hidrodinâmico fornece a informação referente às ondas a absorver e o sistema de controlo assegura que o batedor do gerador de ondas se desloca de modo a absorver as ondas indesejadas.

Para a obtenção do *feedback* hidrodinâmico podem ser utilizados diversos tipos de sensores. Entre os mais comuns, destacam-se aqueles que medem a altura da superfície livre da água imediatamente na frente do batedor (o sensor move-se conjuntamente com o batedor). Outra possibilidade é usar um sensor, também solidário com o batedor, mas que mede a força das ondas sobre o batedor. O uso de sensores colocados a uma determinada distância do batedor é outro exemplo. Outros sensores possíveis, mas que não têm sido aparentemente usados, são os medidores de velocidade. A selecção do tipo de sensor faz-se normalmente com base nas suas vantagens e desvantagens, que dependem, entre outros, dos seguintes factores (ver Schäffer e Klopman, 2000):

1. Os sensores montados a uma determinada distância da frente do batedor têm a vantagem de realizar medições antecipadas da elevação da superfície da água. Este procedimento possibilita tempo de reacção ao sistema, facilitando, deste modo, o dimensionamento de um sistema estável. Uma desvantagem associada à localização destes sensores é a possibilidade que há de ocorrerem erros cumulativos de fase das ondas por ser necessário estimar o tempo de propagação da onda desde o sensor até à frente do batedor. Este tempo de propagação é tomado em consideração e normalmente estimado com base na teoria linear das ondas.



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

2. Uma vantagem da utilização de sensores solidários com o batedor é o facto de as medições serem realizadas num referencial Lagrangiano de referência. A cinemática e a dinâmica das ondas quando expressas neste referencial apresentam um carácter mais linear do que quando expressas num referencial Euleriano de referência (e.g., Woltering e Daemrich, 1994). Este facto permite assim estender o campo de validade e aplicabilidade da teoria linear das ondas no dimensionamento dos sistemas activos de absorção activa.
3. Os modos evanescentes alteram o campo das ondas perto do batedor, afectando assim a altura da superfície da onda e a pressão da onda sobre o batedor. Este facto deve ser considerado no dimensionamento dos sistemas activos de absorção, caso os sensores sejam colocados na "região evanescente", especialmente se as ondas a absorver são pequenas.
4. Os sensores que medem propriedades integrais, tais como a força da onda sobre o batedor, são menos susceptíveis a perturbações locais do que os sensores que medem quantidades locais.
5. Nas altas-frequências, as forças que actuam sobre o batedor são dominadas pelas forças de inércia. Este facto deve-se à massa acrescentada correspondente aos modos evanescentes da onda. Assim, apenas uma pequena parte da força medida é devida às ondas progressivas (as quais se pretendem ver absorvidas), pelo que erros desta natureza são inevitáveis.
6. A função de transferência envolvida no procedimento de absorção activa depende do tipo de feedback hidrodinâmico escolhido. Maison Dieu e Clément (1993) mostraram que escolhendo a força da onda na frente do batedor para feedback, a função de transferência corresponde a um filtro não-causal puro. Dado que os filtros não-causais não são realizáveis na prática, poder-se-á desenhar o sistema apenas para uma frequência específica e não para um intervalo de frequências. Escolhendo outra grandeza diferente para feedback o problema pode ser atenuado.

2.1 Breve descrição do sistema AWASYS

O sistema de absorção dinâmica AWASYS, em análise neste trabalho (Troch, 2005), tem como princípio de funcionamento a utilização em tempo-real (*online*), no domínio do tempo, de filtros digitais do tipo FIR (*Finite Impulse Response*), aplicados às ondas incidentes e reflectidas no processo de geração no canal. Para o funcionamento do sistema é necessária a medição simultânea das elevações da superfície livre em duas sondas colocadas num campo distante (*far field*), tipicamente a cerca de 3 m do batedor, e separadas de cerca de 30 cm. Em cada instante, o trem de ondas reflectidas, indesejado, é separado do trem de ondas incidentes através de filtragem digital. O movimento do batedor necessário para absorver as ondas reflectidas é determinado e adicionado ao comando do batedor original (Frigaard e Christensen, 1994). Muito sucintamente, o método compreende as seguintes fases (Figura 1):

1. A onda incidente é propagada e é reflectida pela estrutura a ensaiar; Esta onda reflectida, que efectivamente existe na natureza, não se quer re-reflectida pelo batedor;
2. Em certo ponto do canal usam-se duas sondas que permitem, mediante filtragem digital, a separação em tempo real da agitação incidente e reflectida;
3. Essas ondas reflectidas são depois "retro-propagadas" usando sobreposição de componentes e operações de TF. Tem-se, então, junto ao batedor, o correspondente sinal que tem de ser absorvido;
4. Calcula-se, através da função de transferência hidrodinâmica (Bièsel e Suquet, 1951) e da função de transferência do batedor (determinada por calibração dinâmica do batedor), o sinal a fornecer ao batedor de modo a absorver essa reflexão;
5. Finalmente, soma-se essa compensação ao sinal normal incidente.

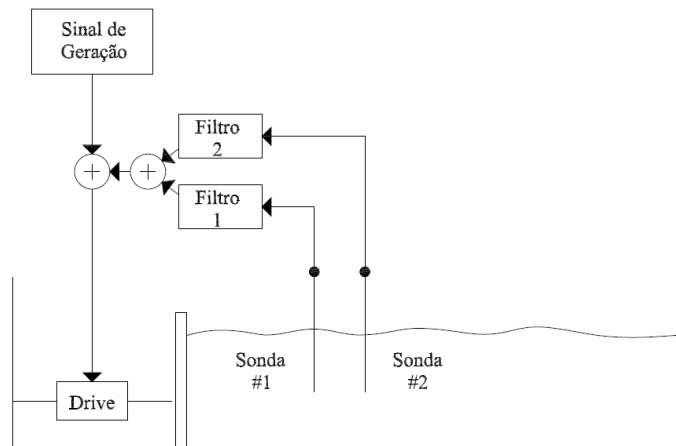


Figura 1 – Princípio de absorção (Troch, 2005).

Descrito o princípio de funcionamento do sistema, resta apresentar, muito sucintamente também, a teoria que conduzirá às respostas em frequência dos filtros a aplicar no domínio do tempo¹.

Na Figura 2 ilustra-se um canal de ondas equipado com duas sondas (Sonda #1 e Sonda #2) localizadas em posições à distância de, respectivamente, x_1 e x_2 relativamente à posição de repouso do bater (separadas por Δx). As sondas medem a elevação da superfície livre da água com uma frequência de aquisição, f_a . A profundidade da água é d .

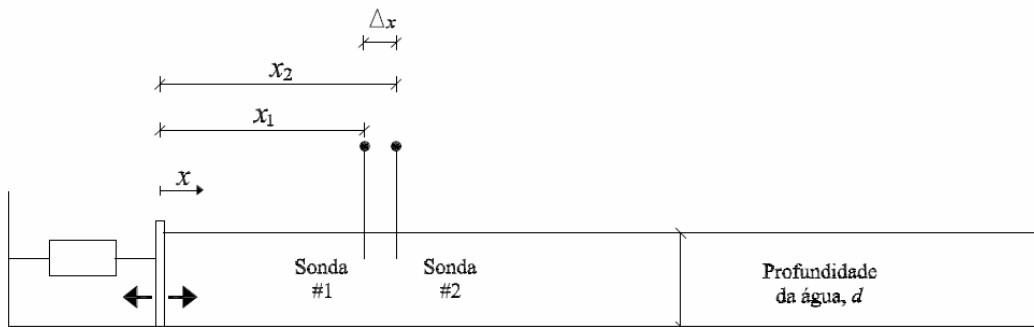


Figura 2 – Canal de ondas com um gerador do tipo-pistão.

O sinal da elevação da superfície numa dada posição x pode ser descrito como a soma de várias harmónicas. Considerando apenas uma harmónica no campo distante (*far field*), onde os efeitos dos modos evanescentes são desprezáveis, o sinal de elevação associado pode ser escrito como a soma das correspondentes ondas (progressivas) incidente e reflectida,

$$\eta(x, t) = \eta_I(x, t) + \eta_R(x, t) = A_I \cos(\omega t - kx + \phi_I) + A_R \cos(\omega t + kx + \phi_R)$$

onde A_I e A_R são as amplitudes e ϕ_I e ϕ_R as fases das ondas incidente e reflectida, respectivamente; $k = 2\pi/L$ e $\omega = 2\pi/T$ estão relacionados pela relação de dispersão $\omega^2 = kg \tanh kd$ e representam o número de onda e a frequência angular, respectivamente; g é a aceleração da gravidade, d a profundidade de água do canal, T o período da onda, e L é o comprimento de onda.

¹ Mais detalhes sobre a teoria de funcionamento do sistema assim como sobre aspectos relativos ao dimensionamento dos filtros digitais envolvidos podem ser encontrados em Troch (2005) e em Vicente e Capitão (2006).



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

Quando as componentes da onda reflectida atingem o batedor, sofrem nova reflexão, dando origem à re-reflexão das componentes, as quais importa eliminar. Assumindo que a nova reflexão provocada pelo batedor é total, a componente de onda re-reflectida vem dada por,

$$\eta_{RR}(t) = A_R \cos(\omega t - kx + \phi_R)$$

Teoricamente, de modo a cancelar esta onda re-reflectida, basta que o batedor no momento em que provoca a nova reflexão gere componentes de onda iguais às das re-reflectidas mas em oposição de fase, isto é,

$$\eta_{-RR}(t) = A_R \cos(\omega t - kx + \phi_R + \pi)$$

Quando sobrepostas, as componentes re-reflectidas e as geradas pelo batedor cancelam-se e, assim, o problema da re-reflexão deixa de existir. Assumindo que existe uma relação linear entre o movimento do batedor e a correspondente elevação da superfície, o deslocamento do batedor, $X_{-RR}(t)$, que origina $\eta_{RR}(t)$, é dado por,

$$X_{-RR}(t) = \frac{1}{K_f(\omega)} A_R \cos(\omega t + \phi_R - \phi_f(\omega) + \pi)$$

onde $K_f(\omega)$ e $\phi_f(\omega)$ são as funções módulo e fase da função resposta em frequência da função de transferência hidrodinâmica de Bièsel e Suquet, 1951, correspondente ao tipo de gerador de ondas usado. $K_f(\omega) = A/S_0$ é o quociente entre a amplitude da onda, A , e a amplitude do movimento do batedor, S_0 . Para geradores do tipo pistão tem-se (ver Bièsel e Suquet, 1951),

$$\begin{cases} K_f(\omega) = \frac{4 \sinh^2 kd}{\sinh 2kd + 2kd} \\ \phi_f(\omega) = \frac{\pi}{2}, \nabla \omega \end{cases}$$

O problema que se coloca no imediato é de como obter o sinal de correcção. Ora, é possível amplificar e deslocar a fase de apenas dois sinais de elevação da superfície em dois pontos distintos em frente ao batedor, de tal forma, que a sua soma é igual ao sinal de correcção. Nos dois pontos de medida, as elevações da superfície livre da água são dadas por,

$$\eta(x_1, t) = A_I \cos(\omega t - kx_1 + \phi_I) + A_R \cos(\omega t + kx_1 + \phi_R), \text{ e}$$

$$\eta(x_2, t) = A_I \cos(\omega t - kx_2 + \phi_I) + A_R \cos(\omega t + kx_2 + \phi_R), \text{ ou seja,}$$

$$\eta(x_2, t) = A_I \cos(\omega t - kx_1 - k\Delta x + \phi_I) + A_R \cos(\omega t + kx_1 + k\Delta x + \phi_R)$$

em que $x_2 = x_1 + \Delta x$.

Através de um processo de filtragem linear, os sinais medidos pelas sondas #1 e #2 são amplificados por $|D(\omega)|$ e as fases deslocadas por $\Phi_1(\omega)$ e $\Phi_2(\omega)$, respectivamente. A solução que define as características teóricas (ideais) que os filtros devem ter para ocorrer absorção das ondas indesejadas é dada por (Vicente e Capitão, 2006):

$$\begin{cases} \Phi_1(\omega) = -\phi_I - k\Delta x - kx_1 + \frac{3\pi}{2}, \\ \Phi_2(\omega) = -\phi_I - kx_1 + \frac{\pi}{2}, \\ |D(\omega)| = \frac{1}{K_f(\omega)} \cdot \frac{1}{2 \left| \cos\left(-k\Delta x + \frac{\pi}{2}\right) \right|} \end{cases}$$

Na Figura 3 estão representados dos filtros teóricos respectivos.

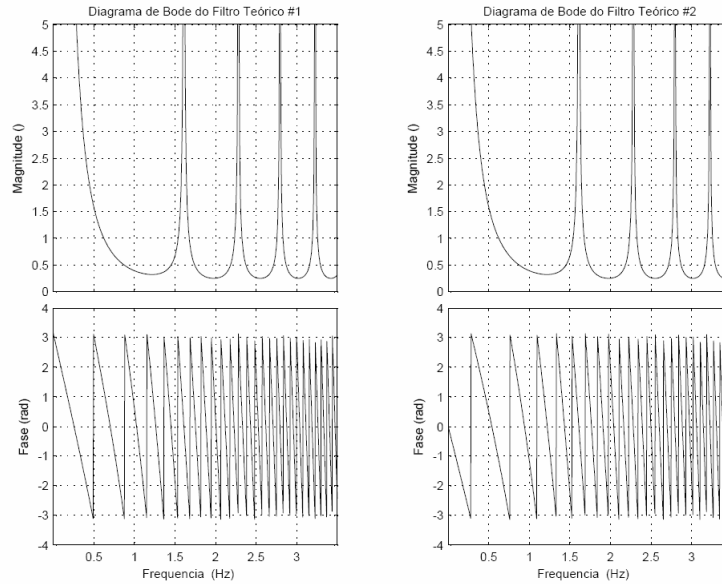


Figura 3 – Diagrama de Bode dos filtros teóricos do AWASYS (Troch, 2005).

Os filtros que integram o módulo AWASYS foram dimensionados em tempo discreto, recorrendo a filtros lineares não-recursivos, também denominados por filtros FIR (*Finite Impulse Response*). Para este tipo de filtro, com um número ímpar de coeficientes, N , a saída do sistema é atrasada inevitavelmente $\frac{N-1}{2f_s}$ segundos, onde f_s denota a frequência de amostragem do filtro. Este atraso não deve ser ignorado no dimensionamento do filtro, pois altera a fase do sistema e, por conseguinte, pode levar o sistema à instabilidade (o atraso é modelado por um filtro de amplitude unitária e por uma determinada fase). É necessário, portanto, introduzir aquela fase adicional nos filtros. Deste modo, procedendo a esta compensação, as características desejadas dos filtros #1 e #2 tomam a seguinte forma final,

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_1(\omega) = -\phi_f - k\Delta x - kx_1 + \frac{3\pi}{2} + \frac{N-1}{2f_s} \omega, \\ \Phi_2(\omega) = -\phi_f - kx_1 + \frac{\pi}{2} + \frac{N-1}{2f_s} \omega, \\ |D(\omega)| = \frac{1}{K_f(\omega)} \cdot \frac{1}{2 \left| \cos\left(-k\Delta x + \frac{\pi}{2}\right) \right|} \end{array} \right.$$

Se se reparar na última equação deste sistema constata-se que aquela é o produto de dois termos. O primeiro termo é o inverso do coeficiente de Bièsel e Suquet (1951), no campo distante, o qual tende para infinito à medida que ω tende para zero (ver Figura 4).

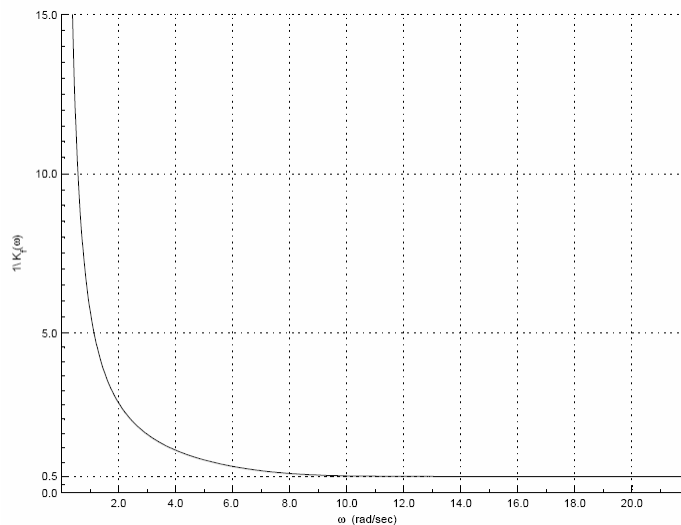


Figura 4 – Inverso do coeficiente de Biessel no campo distante versus frequência ($d = 0.30$ m).

Deste modo, a absorção de ondas indesejadas de baixa frequência requer um movimento do batedor com grande amplitude ($|D(\omega)|$ é elevado). Na prática, este termo deve ser truncado nas baixas frequências para que a amplitude não exceda o seu valor máximo e, consequentemente, não danifique o mecanismo. O segundo termo está associado à separação das ondas incidentes e reflectidas. Este termo aproxima-se do infinito nas frequências para as quais,

$$k\Delta x = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Para frequências na proximidade destas singularidades, qualquer ruído presente na medição da elevação da superfície livre será amplificado e conduzirá a erros significativos no movimento de correcção do batedor $X^*(t)$. Por conseguinte, a distância entre as sondas, Δx , deve ser cuidadosamente definida de modo a que não haja ocorrências de singularidades dentro do intervalo de frequências de trabalho (na prática isto é alcançado se $0.5L \leq x \leq 0.45L$).

3. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA AWASYS NO CANAL DE ONDAS IRREGULARES

Abordados muito sucintamente os principais aspectos teóricos do sistema AWASYS, descrevem-se agora os procedimentos seguidos na sua implementação e verificação no canal de ondas irregulares COI1 do LNEC. Antes de o sistema ser utilizado deve calibrar-se o batedor e dimensionarem-se os coeficientes dos filtros FIR usados no sistema. Antes de cada sessão de ensaios devem também calibrar-se os sensores (neste caso, sondas resistivas), que fornecem a informação de feedback hidrodinâmico.

3.1 Calibração do batedor

A calibração do batedor só deverá ser efectuada quando se pretender incorporar o sistema AWASYS com uma nova configuração de canal. Para o caso presente, referente ao canal de ondas irregulares COI1 do LNEC, encontrou-se a seguinte recta de calibração do batedor, mostrada na Figura 5.

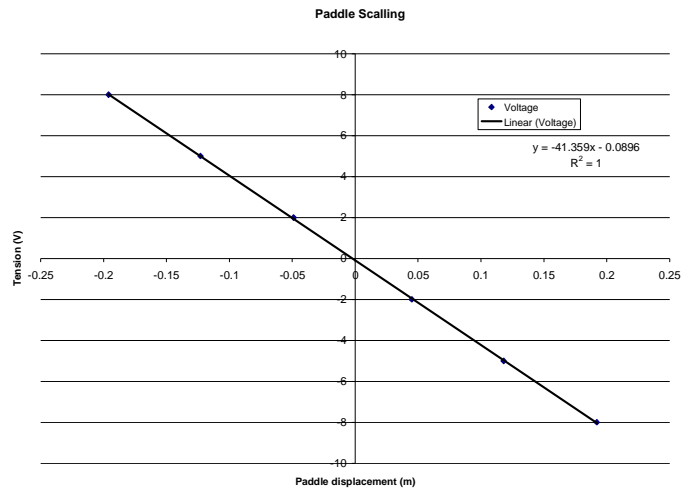


Figura 5 – Calibração do batedor.

Esta recta fornece uma relação entre o deslocamento, em m, desde a posição de equilíbrio do batedor, e a tensão, em V, a fornecer ao batedor para realizar aquele deslocamento. Idealmente esta relação deverá ser linear, o que é o caso, aproximadamente. Esta calibração deverá futuramente ser realizada pelo software SAM de forma automática.

3.2 Dimensionamento do filtro FIR

Os procedimentos indicados para esta fase deverão ser efectuados sempre que se considere nova configuração do sistema, isto é, sempre que houver lugar a alterações nas dimensões (nomeadamente no comprimento do canal e na profundidade da água), no tipo de batedor ou no posicionamento das duas sondas do sistema. Neste caso, para cada nova configuração do sistema, há que redimensionar o filtro (mediante cálculo de novos coeficientes) a utilizar, através da execução do módulo "FIRDesign". Este passo é importantíssimo e dele depende a correcta compensação do batedor.

Na execução deste módulo do pacote de software SAM, há um conjunto de recomendações principais a seguir, ver Figura 6:

1. As frequências de corte "LowCutOff" e "HighCutOff" devem ser escolhidas de forma a abranger a gama de frequências de interesse para o modelo;
2. O valor do desempenho do sistema AWASYS (Performance) deve, na gama de frequências de interesse para o modelo (acima referida), ser aproximadamente unitário. Para isso, quando há mudança de configuração, e mantendo a profundidade, dever-se-á afinar " x_1 " e, principalmente, " x_2 ", seguindo as recomendações relativas às distâncias a cumprir entre sondas preconizadas por Goda (1985);
3. A ordenada na origem "Top b" pode ser ajustada de modo a que as curvas "Gain 1" e "Gain 2" tenham um comportamento suave, sem descontinuidades;

O parâmetro "OverSampFactor" determina o factor de sobre-amostragem que se pretende realizar na função desempenho e em nada altera os filtros. O objectivo é ter apenas uma noção mais pormenorizada do desempenho entre as frequências discretas que serviram de base ao dimensionamento dos filtros (somente para este conjunto de frequências é que o filtro tem desempenho coincidente com o teórico).

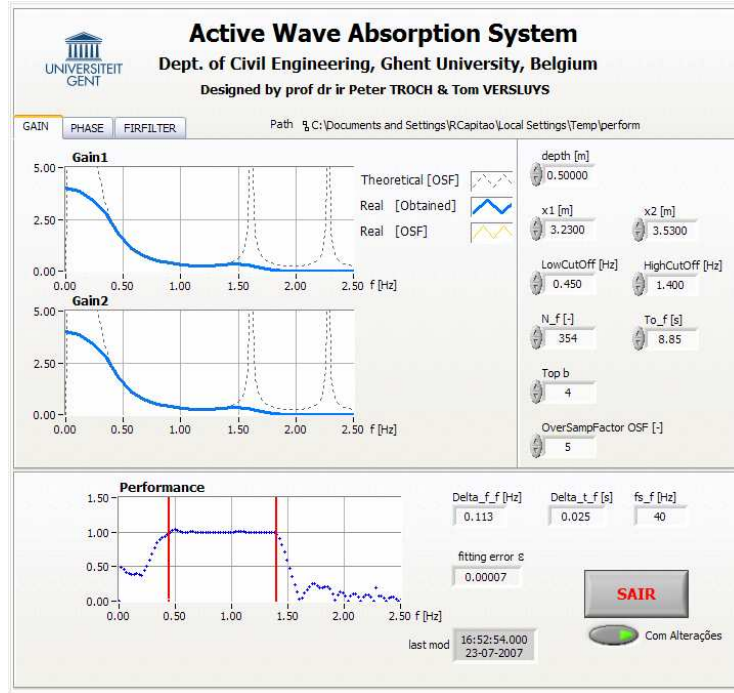


Figura 6 – Aspecto do módulo AWASYS.

Ao premir-se, depois de verificados todos os campos, o botão "SAIR", serão escritos nos ficheiros designados por "filter" e "perform" (localizados na pasta temporária do utilizador) os novos coeficientes do filtro FIR, a carregar (automaticamente) pelo módulo "SAM MOD 3 + AWASYS" (ver Figura 7). Na mesma pasta temporária, há um outro ficheiro "awasys", que também é carregado, que contém as configurações do sistema.

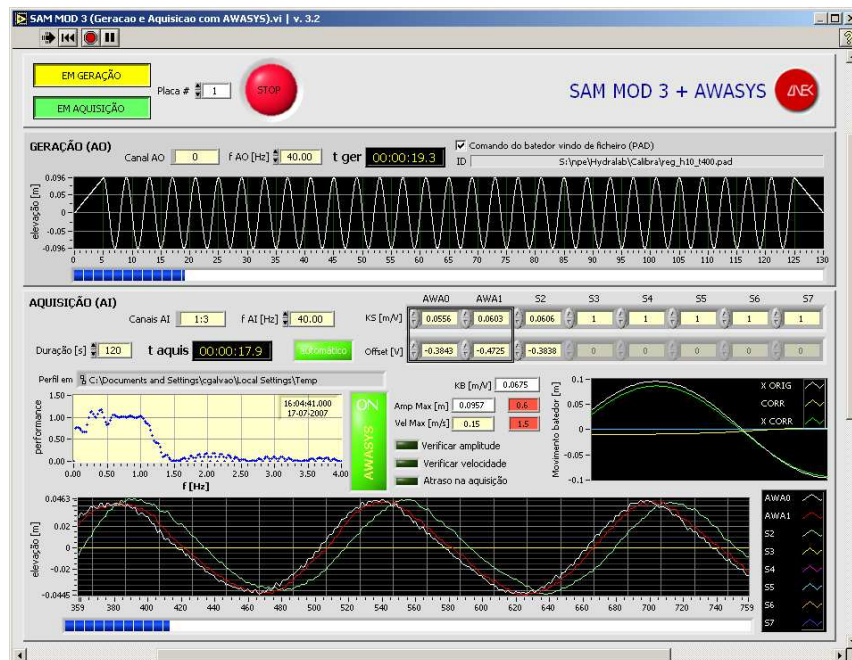


Figura 7 – Aspecto do módulo SAM – MOD 3 + AWASYS.

3.3 Calibração das Sondas

A calibração das sondas deverá ser realizada sempre antes de efectuar cada conjunto de ensaios e deve ser, pelo menos, diária, ou quando sejam constatadas diferenças assinaláveis das condições de humidade, temperatura ou pressão, nas instalações experimentais onde se realizam os ensaios. Actualmente, esse processo consiste em efectuar medições, mediante a utilização de um voltímetro ou do módulo "SAM MOD 4 - Calibração de Sondas", da tensão em cada sonda em duas posições mínima e máxima, T_{min} e T_{max} respectivamente, da régua de medição dessa sonda. Esta diferença de tensão, em V, pode então ser relacionada com a diferença correspondente, Δh , em m, da escala da régua. Serão assim determinadas as constantes das sondas, KS , em m/V.

$$KS = \frac{\Delta h}{T_{max} - T_{min}}$$

Realizada a calibração das sondas, os valores da elevação da superfície livre podem ser obtidos mediante aquisição da dados e posterior multiplicação desta pelo coeficiente de calibração correspondente à sonda considerada.

3.4 Verificações

Foi efectuada um conjunto de testes ao sistema de geração e aquisição com o sistema de absorção dinâmica de reflexões AWASYs ligado e desligado, de forma a testar a validade e a adequação deste novo sistema às instalações experimentais. Para todos os testes, utilizou-se o canal de ondas irregulares do LNEC, designado por CO11 (Figura 8), que tem as características indicadas na Figura 9. Neste canal foram colocadas 4 sondas (de S1 a S4), as duas primeiras das quais (S1 e S2) pertencem ao sistema AWASYs. A profundidade de água foi de 0.50 m.



Figura 8 – Vista lateral do canal de ondas irregulares CO11.

Foram realizadas várias séries de ensaios com ondas regulares e ondas irregulares. Porém, neste trabalho é apenas apresentado um dos casos de teste com ondas irregulares, mais representativo. Com este caso, pretendia-se gerar um trem de ondas irregulares, de 300 s, associado a um espectro de JONSWAP com as seguintes características: altura significativa $HS = 0.15$ m; período de pico do espectro $TP = 1.13$ s e parâmetro de largura espectral $\gamma = 3.3$.

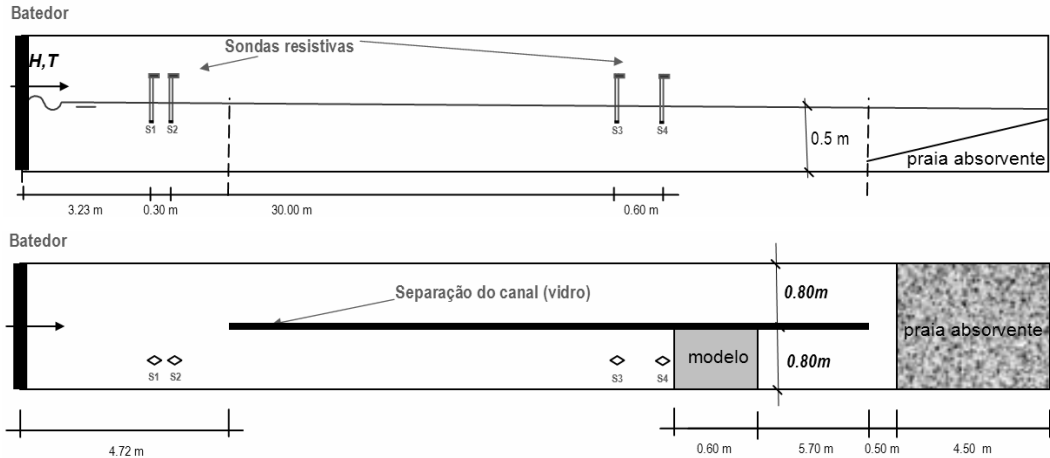


Figura 9 – Alçado principal e planta do canal de ondas irregulares CO11 numa configuração típica de ensaio de um modelo físico (cotas em m).

Na Figura 10 pode ver-se uma comparação entre o espectro incidente pretendido e os espectros incidentes no campo de ondas abrangido pelas sondas S1 e S2 (as mais próximas do batedor) com o sistema AWASYS ligado (“YES”, nas designações das curvas da figura) e com o sistema AWASYS desligado (“NO”, nas designações das curvas da figura) considerando duas situações de reflexão na extremidade do canal: com uma inclinação suave (“slope”, nas designações das curvas da figura), com previsível fraca reflexão, e com uma parede vertical (“wall”, nas designações das curvas da figura), situação com previsível elevada reflexão.

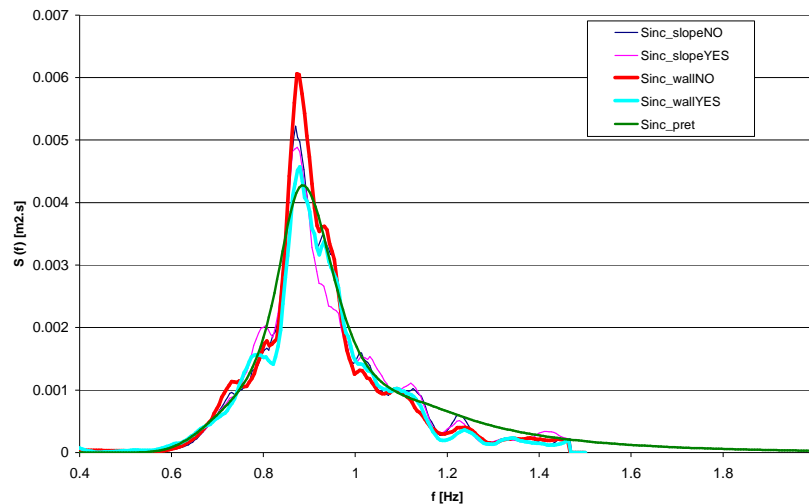


Figura 10 – Comparação entre espectros incidentes em S1 e S2.

Neste caso, em que se analisa as ondas incidentes na zona das sondas S1 e S2 (próximos do gerador), verifica-se que se o sistema estiver desligado (“NO”), há efectivamente densidades de energia das onda incidentes (espectro a vermelho e espectro a azul escuro) superiores ao pretendido (espectro a verde), principalmente para as componentes do espectro mais energéticas, na vizinhança da frequência de pico. Com o sistema AWASYS ligado (“YES”), verifica-se uma maior adequação dos espectros de energia das ondas incidentes (espectro a azul claro e espectro a lilás) ao espectro incidente pretendido (espectro a verde).

De modo similar, na Figura 11 pode ver-se idêntica comparação entre os espectros incidentes no campo de ondas abrangido pelas sondas S3 e S4 (as mais afastadas do batedor) para as mesmas condições: sistema AWASYS ligado (“YES”); sistema AWASYS desligado

(“NO”); inclinação suave (“slope”) e parede vertical (“wall”). Para este caso, constata-se uma atenuação geral da energia das ondas incidentes, qualquer que seja a situação, que é consequência da distância desde o batedor aos locais de medição. Claramente também, há uma redução da energia das ondas incidentes na gama de frequências acima da frequência de pico, quando comparada com a energia das ondas incidentes pretendida (espectro a verde), assim como uma ligeira translação da frequência de pico para frequências mais baixas,

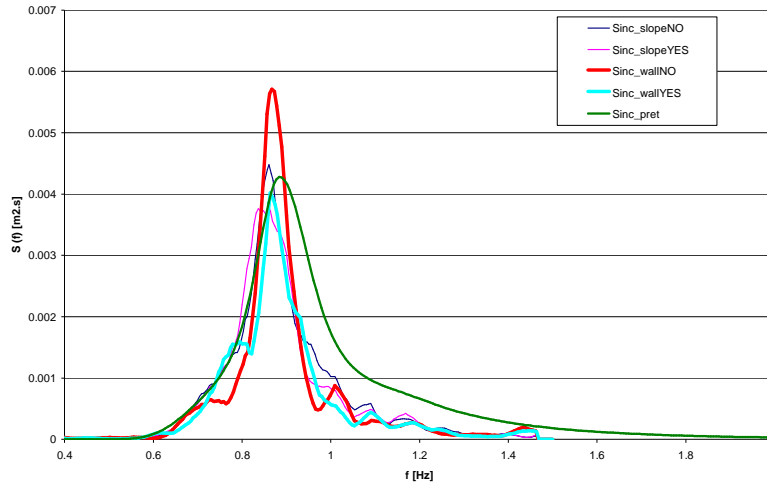


Figura 11 – Comparação entre espectros incidentes em S3 e S4.

Contudo, verifica-se igualmente que, no caso de o sistema estar desligado (“NO”), as densidades de energia das ondas incidentes (espectro a vermelho e espectro a azul escuro) superiores ao pretendido (espectro a verde), principalmente para as componentes do espectro mais energéticas. Uma maior adequação dos espectros de energia das ondas incidentes (espectro a azul claro e espectro a lilás) ao espectro incidente pretendido (espectro a verde) é obtida quando o sistema AWASYS está ligado (“YES”).

Na Figura 12 pode ver-se a comparação na área de influência das sondas S1 e S2, desta vez para os espectros reflectidos, para as mesmas condições já mencionadas do sistema AWASYS (“NO” e “YES”) e da reflexão na extremidade do canal (“slope” e “wall”).

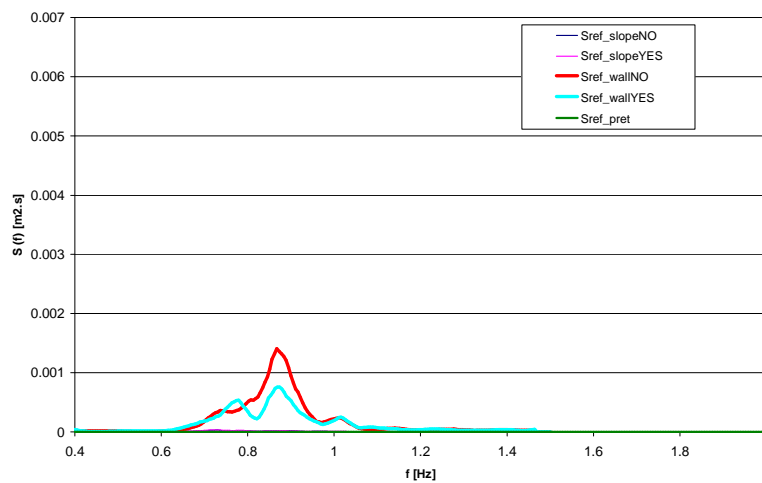


Figura 12 – Comparação entre espectros reflectidos em S1 e S2.



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

De modo similar, na Figura 13 pode ver-se a comparação correspondente na área de influência das sondas S3 e S4 para os espectros reflectidos para as mesmas referidas condições. Para ambos os casos, o espectro reflectido pretendido é, evidentemente, nulo.

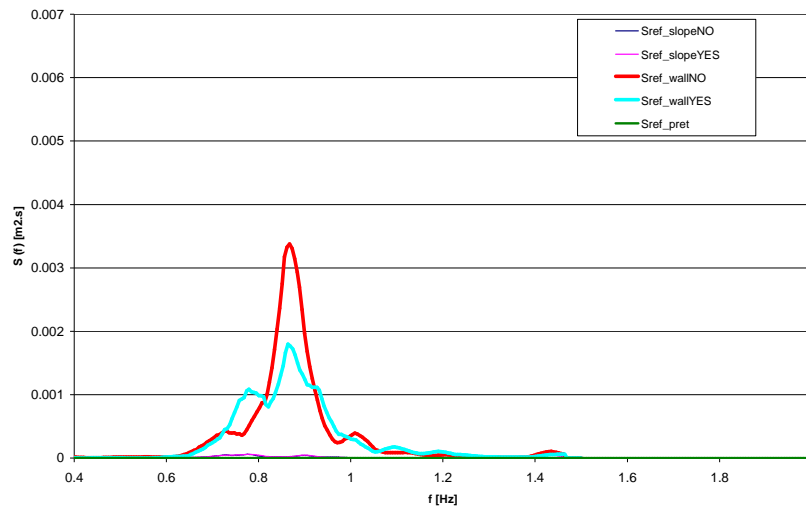


Figura 13 – Comparação entre espectros reflectidos em S3 e S4.

Em ambas as localizações, verifica-se que o sistema AWASYS, embora melhore substancialmente os resultados, reduzindo a reflexão naqueles locais, não é totalmente eficaz, isto é, não consegue eliminar totalmente a reflexão (ver Figura 12 e Figura 13). Contudo, reduz substancialmente essa componente não desejada.

4. NOTAS FINAIS

Da análise das comparações efectuadas verifica-se que o sistema implementado no canal de ondas irregulares do LNEC produz resultados bastante razoáveis, corroborados pela observação da razoável concordância entre espectros incidentes pretendidos e obtidos, quando o sistema AWASYS está ligado.

Porém, os resultados obtidos com a utilização do sistema AWASYS estão ainda aquém do óptimo ou desejável. Efectivamente, verifica-se que o sistema apresenta a tendência para produzir correcções associadas à compensação das reflexões superiores às desejáveis. Claramente, é desejável a realização de mais ensaios para melhor aferir o desempenho do sistema e permitir uma correcção mais rigorosa.

REFERÊNCIAS

- Bièsel, F. e F. Suquet (1951). Les appareils générateurs de houle en laboratoire. La Houille Blanche, 147.
- Frigaard, P. e M. Brorsen (1995). A time-domain method for separating incident e reflected irregular waves. Journal of Coastal Engineering 24 (3, 4), 205–215.
- Frigaard, P. e M. Christensen (1994). An absorbing wave-maker based on digital filters. In Proceedings, 24th International Conference on Coastal Engineering, Volume 1, Kobe, pp. 168–180.
- Goda, Y. (1985). Random seas and design of maritime structures. University of Tokyo Press.



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

- Goda, Y. e Y. Suzuki (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. In Proceedings, 15th International Conference on Coastal Engineering, Volume 1, Honolulu, HI, pp. 828–845.
- Maisondieu, C. e A. H. Clément (1993). A realizable force feedback-feedforward control loop for a piston wave absorber. In Proceedings, 8th Workshop on Water Waves and Floating Bodies, St. John's, Newfoundland, pp. 79–82.
- Mansard, E. e E. Funke (1980). The measurements of incident and reflected spectra using a least squares method. In Proceedings, 17th International Conference on Coastal Engineering, Volume 1, Sidney, Australia, pp. 154–172.
- Shäffer, H. A. e G. Klopman (2000). Review of multidirectional active wave absorption methods. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 126 (2), 88–97.
- Troch, P. (2005). User Manual: Active Wave Absorption System. Technologiepark 904, B-9052 Zwijnaarde, Ghent, Belgium: Ghent University. 13
- Vicente, M. e R. Capitão (2006). Instalação de um sistema de absorção dinâmica de reflexões no canal de ondas irregulares do LNEC. Relatório IST/LNEC, Lisboa.
- Woltering, S. e K. F. Daemrich (1994). Mass transport and orbital velocities with Lagrangian frame of reference. In Proceedings, 24th International Conference on Coastal Engineering, Kobe, Japan, pp. 2828–2842.