



**UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA**

**INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO**

**MODELAÇÃO ESTOCÁSTICA NUMÉRICA E FÍSICA  
DA AGITAÇÃO MARÍTIMA**

**Rui Jorge Pereira Capitão**

(Mestre)

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa no âmbito do protocolo de cooperação entre o IST e o LNEC

Orientador: Doutor Ildeberto Bernardo da Mota Oliveira

Co-orientador: Doutor Manuel José da Silva Mendes de Carvalho

Presidente: Reitor da Universidade Técnica de Lisboa

Vogais: Doutor Fernando Francisco Machado Veloso Gomes  
Doutor Ildeberto Bernardo da Mota Oliveira  
Doutor Carlos António Pancada Guedes Soares  
Doutor Manuel José da Silva Mendes de Carvalho  
Doutor Emanuel Maria de Montenegro Ferreira Coelho  
Doutor António Alberto Pires Silva

Junho de 2001



# PREFÁCIO

Este documento contém a parte escrita do trabalho da tese de doutoramento intitulada "*Modelação Estocástica Numérica e Física da Agitação Marítima*". Como o nome sugere, a caracterização e simulação, numérica e física, da agitação marítima são abordadas numa perspectiva estocástica.

Acompanha este documento um disco compacto (CD) que contém a versão executável do pacote de software **SAM** - *Simulação da Agitação Marítima*, parte integrante deste trabalho.

Pretendeu-se com este trabalho estudar e desenvolver em computador e em canal ou tanque um conjunto "unificado" de métodos capazes de descrever (caracterizar), simular, gerar, adquirir e analisar agitação marítima. Tratou-se, assim, de sistematizar e desenvolver métodos de simulação numérica e física da agitação marítima com vista à sua utilização prática no desenvolvimento de ensaios em canais e tanques de ondas irregulares. Os resultados deste trabalho têm utilidade imediata em trabalhos correntes de ensaios numéricos e físicos em laboratórios de hidráulica.

O assunto estudado neste trabalho é permanentemente objecto de tratamento na literatura da especialidade e é tema de estudo de diversos grupos de investigação, sendo assim um tema actual e em contínuo desenvolvimento.

Neste trabalho, procurou-se inovar em dois aspectos que, apesar de distintos, estão intimamente relacionados: o aspecto teórico-prático sobre caracterização e simulação numérica e física da agitação marítima, e o aspecto relacionado com o desenvolvimento em computador de um "pacote" de módulos de programação destinados àquela caracterização e simulação, e à análise e processamento de dados recolhidos ou na natureza ou em canais de ondas irregulares.

Em particular, salientam-se os seguintes aspectos:

1. Globalmente, há inovação na *classificação dos diferentes temas*, isto é, na organização dos índices de matérias, que aparecem às vezes desarrumados na literatura da especialidade.
2. A introdução de uma *nova metodologia para a simulação numérica e física de grupos de ondas*. O novo método, designado *escalagem de grupos de ondas*, foi aplicado num canal de ondas irregulares e deverá ser utilizado em futuros ensaios.
3. A investigação sobre a *relação entre a forma do espectro e as características de agrupamento de ondas* e a verificação da *interdependência de diversos parâmetros espectrais* utilizados frequentemente na caracterização de grupos de ondas em registos de onda.
4. A modelação, por análise de registos simulados numericamente e naturais, das funções de *distribuição da duração dos grupos de onda*: distribuição exponencial, num ponto de vista contínuo, e distribuição geométrica, numa perspectiva discreta.
5. A simulação física, em canal de ondas irregulares, de *registos com um dado perfil* (por exemplo, registos reais de temporais) através de uma modificação do método de integração da velocidade horizontal, de Gravesen *et al.*, 1974.

6. Finalmente e sobretudo, a *produção de um conjunto de programas de cálculo automático*, interligados, destinado ao tratamento e simulação numérica e física da agitação marítima e *o modo amigável como se apresentam as diversas opções de simulação numérica e física*. O pacote de *software* produzido terá aplicação bastante ampla ao permitir também a análise de registos (reais ou simulados) de ondas, quaisquer que sejam as suas proveniências. Também a forma como são apresentados e relacionados os diversos módulos do pacote de *software*, e, em especial, as *bibliotecas de ajuda* ao utilizador, as quais contêm assinalável parte do texto do presente trabalho, deverá ser salientada.

## RESUMO

Apesar de actualmente existirem inúmeros modelos numéricos determinísticos capazes de simular a propagação e deformação das ondas de gravidade desde o largo até à costa, verifica-se que esta modelação numérica se revela às vezes inadequada para explicar certos fenómenos mais complexos da agitação marítima e do comportamento das estruturas costeiras, quando estas são solicitadas por aquela agitação. A simulação física em canal ou tanque de ondas irregulares é então essencial na obtenção da informação estatística pretendida, impossível de obter através dos modelos matemáticos existentes.

Tanto a simulação numérica como a simulação física têm vasta importância em laboratórios de investigação em hidráulica marítima, dado que são muitos os estudos de agitação marítima que requerem, por um lado, a utilização de ferramentas numéricas de simulação da agitação marítima e, por outro, a experimentação, em modelo físico, de determinadas características das ondas reais.

O estudo de doutoramento aqui apresentado visou desenvolver e classificar, de um ponto de vista probabilístico ou estocástico, as diferentes matérias sobre simulação numérica e física da agitação marítima em canal de ondas irregulares, e desenvolver em computador, através de um pacote de *software* integrado denominado "**SAM**" - **S**imulação da **A**gitação **M**arítima, um conjunto de métodos para a caracterização, simulação, geração e aquisição da agitação marítima. Este estudo terá então aplicação imediata nos laboratórios de hidráulica marítima na realização de ensaios de agitação em canais e tanques de ondas irregulares.

Palavras-chave: Simulação, geração, aquisição, agitação marítima, ondas irregulares, ensaios físicos, geradores de ondas.



# ABSTRACT

Although there exist a large number of numerical deterministic models able to simulate the propagation and deformation of sea waves travelling from deep water to coastal areas, it seems that such numerical models are sometimes inadequate to fully describe complex sea wave phenomena and coastal structures behaviour. Physical simulations on wave flumes and tanks are then necessary to obtain the statistical information impossible to achieve through the use of the referred to numerical models.

Both numerical and physical simulations are of crucial value in maritime hydraulic laboratories, given the fact that there is a high demand of sea wave studies that require both the use of numerical tools for the simulation of sea waves and physical model experimentation on some characteristics of unspecified/pre-specified target or natural waves.

The doctoral study presented in this thesis was intended to develop and classify from a probabilistic or stochastic standpoint the different subjects of the numerical and physical simulation on wave flumes or tanks, and to implement on the computer a set of methods for the characterization and simulation of sea waves and processing wave data either from nature or from wave flumes by using the so-called "SAM" integrated software package. Thus, the study presented in this thesis will be of immediate application on the setting up of wave studies in flumes or tanks of any hydraulic laboratory.

Key-words: Simulation, generation, acquisition, wave agitation, irregular waves, physical tests, wave generators.

Mots: Simulation, génération, acquisition, agitation maritime, houle irrégulière, tests physiques, générateurs d'houle.





# AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, desejo expressar o meu agradecimento a todas as pessoas e entidades que, de uma forma ou de outra, directa ou indirectamente, me ajudaram neste trabalho.

Agradeço especialmente aos meus orientadores científicos, Professor Catedrático Ildeberto Mota Oliveira, do Instituto Superior Técnico, e Investigador-Coordenador Manuel Mendes de Carvalho, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, onde este trabalho foi desenvolvido; o primeiro pela orientação geral, pelas sucessivas revisões da presente dissertação e pela disponibilidade demonstrada sempre que eu dela necessitava, e o segundo pelo acompanhamento muito próximo e sábia orientação do trabalho efectuado, pelas valiosas sugestões, e, principalmente, pelo seu constante apoio, incentivo, interesse e encorajamento ao longo de todo o período do trabalho de doutoramento.

Devo também um especial agradecimento ao Professor Josep Ramon Medina, da Universidade Politécnica de Valência, Espanha, pelas sugestões de trabalho, pelas trocas de impressões e pela hospitalidade com que me acolheu durante uma breve estada na universidade onde lecciona. À Professora Angela Vaz dos Santos, da Fundação Universidade do Rio Grande, Brasil, agradeço também pelas sugestões de trabalho e pela cooperação no trabalho experimental de determinação de praias não reflectoras.

Um sincero obrigado a todos os colegas e amigos do Núcleo de Portos e Praias do Departamento de Hidráulica (DH) do LNEC, em especial àqueles, que, com a sua ajuda nos trabalhos correntes do LNEC, permitiram libertar o meu tempo para a realização desta dissertação.

Esta dissertação só pôde ser realizada devido ao envolvimento de várias instituições que me proporcionaram sempre as condições e os meios necessários ao seu desenvolvimento. Espero ter sabido utilizar essas condições e esses meios da forma mais adequada.

Assim, ao LNEC expresso o meu sincero reconhecimento pela disponibilização dos meios humanos, materiais e financeiros imprescindíveis ao desenvolvimento do trabalho teórico e experimental manifesto neste trabalho. Quero, em especial, agradecer a confiança depositada no trabalho aqui exposto aos chefes do Departamento de Hidráulica, Eng<sup>o</sup> Jaime Melo Baptista, numa fase inicial do trabalho, e Eng<sup>o</sup> Carlos Matias Ramos, na fase final, e aos chefes do Núcleo de Portos e Praias, Eng<sup>o</sup> Marcos Rita, na fase inicial do trabalho e, mais tarde, Eng<sup>o</sup> José Afonso Covas.

À Fundação para a Ciência e a Tecnologia agradeço o financiamento proporcionado pela bolsa de doutoramento PRAXIS XXI, de Referência PRAXIS XXI/BD/5878/95 (Sub-programa Ciência e Tecnologia do 2º Quadro Comunitário de Apoio).

Refiro ainda a minha participação no projecto de investigação NATO PO-NAVIGATION, o que permitiu a aquisição do pacote de software "LabVIEW 4.0" e respectivas actualizações, a aquisição de uma placa de geração e aquisição de dados "National Instruments" e, também, o financiamento de duas missões ao estrangeiro para apresentação de parte dos resultados do presente trabalho em congressos científicos internacionais.

Finalmente, endereço um agradecimento especial à minha família: à minha mulher, Maria João, pelo apoio constante, ao meu filho Pedro, por me ter proporcionado alegria no trabalho, e aos meus pais, Maria e Joaquim, por me terem possibilitado a minha formação académica inicial.

# ÍNDICE DO TEXTO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>PARTE I .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>                                | <b>3</b>  |
| 1.1 ENQUADRAMENTO.....   | 3         |
| 1.2 ORGANIZAÇÃO .....  | 3         |
| 1.3 CONCEITOS E DEFINIÇÕES.....                                    | 6         |
| <br>   |           |
| <b>PARTE II .....</b>  | <b>9</b>  |
| <b>CAPÍTULO 2 - CARACTERIZAÇÃO GERAL DA AGITAÇÃO MARÍTIMA.....</b> | <b>11</b> |
| 2.1 INTRODUÇÃO .....   | 11        |
| 2.2 NOÇÕES DE PROCESSOS ESTOCÁSTICOS.....                          | 11        |
| 2.3 DESCRIÇÃO NO TEMPO .....                                       | 13        |
| 2.3.1 Critérios de definição de onda.....                          | 14        |
| 2.3.2 Distribuições e parâmetros representativos das ondas.....    | 17        |
| 2.3.3 Outras distribuições.....                                    | 18        |
| 2.4 DESCRIÇÃO EM FREQUÊNCIA .....                                  | 18        |
| 2.4.1 Espectro em frequência.....                                  | 19        |
| 2.4.2 Estimação do espectro .....                                  | 20        |
| 2.4.3 Parâmetros espectrais .....                                  | 21        |
| 2.5 TEORIA DOS SISTEMAS .....                                      | 21        |
| 2.6 TEORIA LINEAR DA ONDA.....                                     | 24        |
| 2.7 CONCLUSÕES .....   | 26        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO DE GRUPOS DE ONDAS .....</b>             | <b>27</b> |
| 3.1 INTRODUÇÃO .....  | 27        |
| 3.2 GENERALIDADES SOBRE CARACTERIZAÇÃO DE GRUPOS DE ONDAS .....         | 27        |
| 3.3 CARACTERIZAÇÃO DE GRUPOS DE ONDAS ATRAVÉS DAS ALTURAS DE ONDA.....  | 30        |
| 3.3.1 Método dos chorrilhos.....  | 31        |
| 3.3.2 Método de Kimura.....   | 33        |
| 3.3.2.1 Cadeias de Markov .....   | 33        |
| 3.3.2.2 Aplicação das cadeias de Markov aos grupos de ondas.....        | 35        |
| 3.3.3 Método de Kimura Espectral .....                                  | 37        |
| 3.3.4 Parâmetros diversos no ponto de vista discreto .....              | 39        |
| 3.4 CARACTERIZAÇÃO DE GRUPOS DE ONDAS ATRAVÉS DA ENVOLVENTE .....       | 39        |
| 3.4.1 Cálculo da envolvente.....  | 42        |
| 3.4.1.1 A envolvente de Rice .....                                      | 42        |
| 3.4.1.2 A envolvente de Hilbert .....                                   | 44        |
| 3.4.1.3 A envolvente de Rice/Hilbert .....                              | 44        |
| 3.4.2 Método EIA .....  | 45        |
| 3.4.3 Método REIA .....   | 46        |
| 3.4.4 Parâmetros diversos no ponto de vista contínuo .....              | 47        |
| 3.5 OUTROS MÉTODOS.....   | 48        |
| 3.6 DISTRIBUIÇÃO DA DURAÇÃO DOS GRUPOS DE ONDAS .....                   | 48        |
| 3.6.1 Considerações teóricas .....                                      | 48        |
| 3.6.2 Estudo empírico das durações dos grupos de ondas .....            | 49        |
| 3.7 CÁLCULOS NUMÉRICOS E RELAÇÕES ENTRE OS MÉTODOS .....                | 50        |
| 3.7.1 Valor médio do número de ondas dos grupos de ondas – $E[J]$ ..... | 52        |
| 3.7.2 Relação entre espectro e grupos de ondas .....                    | 67        |
| 3.7.3 Registos em canal vs. registos simulados numericamente .....      | 77        |
| 3.7.4 Nota final.....   | 80        |
| 3.8 CONCLUSÕES .....  | 80        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>CAPÍTULO 4 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE AGITAÇÃO MARÍTIMA.....</b>            | <b>83</b>  |
| 4.1 INTRODUÇÃO .....  | 83         |
| 4.2 SIMULAÇÃO POR ESPECIFICAÇÃO DO ESPECTRO.....                            | 83         |
| 4.2.1 Método da filtragem digital de ruído branco .....                     | 85         |
| 4.2.2 Métodos paramétricos.....   | 85         |
| 4.2.3 Método das fases aleatórias.....                                      | 86         |
| 4.3 SIMULAÇÃO POR ESPECIFICAÇÃO DO ESPECTRO E DO AGRUPAMENTO DE ONDAS ..... | 88         |
| 4.3.1 Especificação do agrupamento através da envolvente.....               | 88         |
| 4.3.1.1 O método REIA .....   | 89         |
| 4.3.1.2 Método da escalagem .....   | 95         |
| 4.3.2 Especificação do agrupamento através de um registo de onda dado ..... | 105        |
| 4.3.2.1 Introdução .....  | 105        |
| 4.3.2.2 Metodologia .....   | 106        |
| 4.3.3 Especificação do agrupamento através da simulação condicionada .....  | 106        |
| 4.3.3.1 Introdução .....  | 106        |
| 4.3.3.2 Metodologia .....   | 107        |
| 4.3.3.3 Algoritmo no domínio do tempo .....                                 | 107        |
| 4.3.3.4 Algoritmo no domínio da frequência .....                            | 108        |
| 4.3.3.5 Aplicação prática.....  | 109        |
| 4.4 CONCLUSÕES .....  | 111        |
| <br>  |            |
| <b>CAPÍTULO 5 - SIMULAÇÃO E MODELAÇÃO FÍSICA DE AGITAÇÃO</b>                |            |
| <b>    MARÍTIMA.....</b>  | <b>113</b> |
| 5.1 INTRODUÇÃO .....  | 113        |
| 5.2 CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS .....   | 114        |
| 5.3 GENERALIDADES SOBRE SIMULAÇÃO FÍSICA.....                               | 117        |
| 5.3.1 Semelhança Modelo-Protótipo .....                                     | 117        |
| 5.3.2 Modelação do Sistema: Movimento do Batedor-Elevação da Água .....     | 118        |
| 5.4 GERAÇÃO DA ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE COM ESPECTRO ESPECIFICADO .....       | 121        |
| 5.4.1 Através de síntese de séries temporais.....                           | 122        |
| 5.4.2 Através de filtragem electrónica de ruído branco.....                 | 123        |

|   |     |
|---|-----|
| 5.5 SEPARAÇÃO DOS ESPECTROS INCIDENTE E REFLECTIDO .....  | 124 |
| 5.5.1 Introdução .....  | 124 |
| 5.5.2 Teoria dos métodos das 2 e das M sondas .....   | 126 |
| 5.5.2.1 Resolução pelo Método das 2 sondas .....  | 130 |
| 5.5.2.2 Resolução pelo Método das M sondas .....  | 131 |
| 5.5.3 Separação dos espectros.....  | 133 |
| 5.5.4 Síntese numérica dos sinais incidente e reflectido .....  | 134 |
| 5.5.5 Espectros incidente e reflectido .....  | 135 |
| 5.5.6 Coeficiente de reflexão .....   | 136 |
| 5.5.7 Altura significativa.....   | 137 |
| 5.5.8 Disposição das sondas .....   | 138 |
| 5.5.9 Simultaneidade dos registos por interpolação .....  | 140 |
| 5.5.10 Algoritmo de cálculo .....   | 142 |
| 5.5.11 Simulações numéricas .....   | 143 |
| 5.5.11.1 Simulação com 2 sondas.....  | 144 |
| 5.5.11.2 Simulação com 3 sondas.....  | 148 |
| 5.5.11.3 Comentários sobre os resultados .....  | 152 |
| 5.5.12 Simulações físicas .....   | 152 |
| 5.5.12.1 Descrição da instalação experimental utilizada.....  | 153 |
| 5.5.12.2 Aquisição com 2 sondas.....  | 153 |
| 5.5.12.3 Aquisição com 3 sondas.....  | 156 |
| 5.5.13 Procedimentos de aplicação dos métodos de simulação numérica e física na determinação da reflexão em praia de 45° de inclinação..... | 163 |
| 5.5.13.1 Simulações físicas no canal .....  | 164 |
| 5.5.13.2 Ensaios efectuados.....  | 166 |
| 5.5.13.3 Resultados obtidos .....   | 167 |
| 5.5.14 Comentários sobre a separação dos espectros incidente e reflectido .....   | 170 |
| 5.6 A COMPENSAÇÃO DO MOVIMENTO DO BATEDOR .....   | 171 |
| 5.7 GERAÇÃO DA ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE COM PERFIL ESPECIFICADO .....   | 172 |
| 5.7.1 Método da integração da velocidade horizontal.....  | 172 |
| 5.7.1.1 Introdução .....  | 172 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 5.7.1.2 | Teoria.....   | 173 |
| 5.7.1.3 | Procedimentos experimentais .....   | 176 |
| 5.7.1.4 | Estabelecimento dos Ensaios .....   | 180 |
| 5.7.1.5 | Análise de Reflexão .....   | 182 |
| 5.7.1.6 | Resultados .....  | 183 |
| 5.7.1.7 | Comentários finais .....  | 194 |
| 5.7.2   | Método da teoria dos filtros .....  | 195 |
| 5.7.3   | Método da decomposição de Fourier .....   | 196 |
| 5.8     | GERAÇÃO DA ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE COM ESPECTRO E GRUPOS DE ONDAS<br>ESPECIFICADOS ..... | 197 |
| 5.9     | CONCLUSÕES .....  | 197 |

### **PARTE III ..... 201**

#### **CAPÍTULO 6 - SOFTWARE DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA E FÍSICA..... 203**

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 6.1     | INTRODUÇÃO .....  | 203 |
| 6.2     | ESPECIFICAÇÕES DE SOFTWARE E HARDWARE .....                 | 205 |
| 6.3     | SISTEMA DE MENUS DE AJUDA AO UTILIZADOR .....               | 207 |
| 6.3.1   | Introdução .....  | 207 |
| 6.3.2   | Sistema de Menus de Ajuda Geral .....                       | 209 |
| 6.3.3   | Sistema de Menus de Execução dos Módulos.....               | 211 |
| 6.4     | FERRAMENTAS DE VISUALIZAÇÃO DE GRÁFICOS .....               | 211 |
| 6.5     | DESCRIÇÃO DOS MÓDULOS.....                                  | 212 |
| 6.5.1   | Autenticação do Utilizador .....                            | 212 |
| 6.5.2   | Módulo de Interface .....                                   | 213 |
| 6.5.3   | Módulo 1 – Simulação Numérica.....                          | 215 |
| 6.5.3.1 | Módulo 1-1 – SIMULAÇÃO BASE ESPECTRO .....                  | 216 |
| 6.5.3.2 | Módulo 1-2 – SIMULAÇÃO BASE ESPECTRO + GRUPOS DE ONDA ..... | 217 |
| 6.5.3.3 | Módulo 1-3 – PERFIL DADO.....                               | 219 |

|  |  |            |
|--|--|------------|
| 6.5.4  | Módulo 2 – Aquisição na Água.....  | 220        |
| 6.5.5  | Módulo 3 – Geração e Aquisição .....   | 222        |
| 6.5.6  | Módulo 4 – Simulação, Geração e Aquisição .....  | 223        |
| 6.5.7  | Módulo 5 – Calibração de Sondas .....  | 224        |
| 6.5.8  | Módulo 6 – Controlo do Batedor .....   | 225        |
| 6.5.9  | Módulo 7 – Análise Espectral .....   | 226        |
| 6.5.10   | Módulo 8 – Análise da Reflexão.....  | 227        |
| 6.5.11   | Módulo 9 – Utilidades .....  | 228        |
| 6.6  | EXEMPLOS DE APLICAÇÃO PRÁTICA .....  | 231        |
| 6.6.1  | Exemplo nº 1: Obtenção das ordenadas de dado espectro empírico.....  | 231        |
| 6.6.2  | Exemplo nº 2: Simulação numérica de um registo com base num<br>dado espectro empírico.....                             | 232        |
| 6.6.3  | Exemplo nº 3: Simulação numérica de um registo com espectro<br>empírico e envolvente dados .....                       | 233        |
| 6.6.4  | Exemplo nº 4: Determinação de um ficheiro de comando para o<br>batedor, por forma a obter um dado perfil na água ..... | 234        |
| 6.6.5  | Exemplo nº 5: Geração do sinal na água correspondente ao ficheiro<br>de comando obtido no exemplo anterior.....        | 235        |
| 6.6.6  | Exemplo nº 6: Análise espectral de um registo.....   | 236        |
| 6.6.7  | Exemplo nº 7: Análise da reflexão .....  | 236        |
| 6.7  | CONCLUSÕES .....   | 237        |
| <b>PARTE IV .....</b>                                |  | <b>239</b> |
| <b>CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b> |  | <b>241</b> |
| 7.1  | GENERALIDADES .....  | 241        |
| 7.2  | PARTE II – SIMULAÇÃO/MODELAÇÃO NUMÉRICA E FÍSICA .....   | 242        |



|  |            |
|--|------------|
| 7.3 PARTE III – PACOTE DE SOFTWARE “SAM” .....           | 246        |
| 7.4 RECOMENDAÇÕES E LINHAS DE INVESTIGAÇÃO FUTURAS ..... | 247        |
| <br>   |            |
| <b>PARTE V .....</b>                                     | <b>251</b> |
| <br>   |            |
| <b>BIBLIOGRAFIA.....</b>                                 | <b>253</b> |
| <br>   |            |
| <b>ANEXOS .....</b>                                      | <b>263</b> |
| Anexo 1 - Ferramentas Matemáticas.....                   | 265        |
| Anexo 2 - Definição de Espectros Empíricos .....         | 273        |
| Anexo 3 - Deduções Matemáticas.....                      | 279        |
| Anexo 4 - Simulação Numérica .....                       | 289        |
| Anexo 5 - Simulação Física.....                          | 295        |
| Anexo 6 - Lista de Módulos e Rotinas SAM.....            | 299        |



# ÍNDICE DE FIGURAS

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Fig. 2-1  | - Perfis de elevações: ❶ espacial ( $t$ fixo) e ❷ temporal ( $x$ fixo) .....  | 13 |
| Fig. 2-2  | - Definição de ondas com base no critério de crista a crista (CCC) .....  | 14 |
| Fig. 2-3  | - Definição de ondas com base no critério de zero ascendente (ZUC) .....  | 15 |
| Fig. 2-4  | - Definição de ondas com base no critério de zero descendente (ZDC) .....   | 15 |
| Fig. 2-5  | - Definição de onda orbital (Onda OC) e relação com a onda de zero ascendente (Onda ZUC) e a onda de zero descendente (Onda ZDC) - adaptado de Pires Silva, 1995..... | 16 |
| Fig. 2-6  | - Definição de espectros unilateral e bi-lateral .....  | 20 |
| Fig. 2-7  | - Sistema linear com entrada $x(t)$ e saída $y(t)$ .....  | 22 |
| Fig. 3-1  | - Grupo de ondas de nível $v$ e sua duração .....   | 28 |
| Fig. 3-2  | - Sinal $\eta(t)$ e respectiva envolvente $R(t)$ .....  | 40 |
| Fig. 3-3  | - Durações da excursão superior, $D$ , inferior, $F$ , e total, $Q$ .....   | 40 |
| Fig. 3-4  | - Espectros de $R(t)$ e $\eta(t)$ .....   | 44 |
| Fig. 3-5  | - Comparação das envolventes $R(t)$ , $E(t)$ e $e(t)$ .....   | 46 |
| Fig. 3-6  | - Distribuição empírica das durações de grupos de ondas para $v = H_s/3$ .....  | 49 |
| Fig. 3-7  | - Exemplo de aplicação do programa SAM MOD 9-4 (Caracterização de Grupos de Onda).....  | 51 |
| Fig. 3-8  | - Exemplo de aplicação do programa SAM MOD 9-3 (Detecção de Cristas em Registos).....   | 51 |
| Fig. 3-9  | - Extracto de um sinal $\eta$ , e as suas envolventes $R(t)$ , " $R(t)$ alisado" e $e(t)$ , correspondentes aos métodos RH, RHa e REIA.....                           | 59 |
| Fig. 3-10 | - Comparação de métodos de estimação de $E[J]$ , para o nível $v = H_s/2$ .....   | 60 |
| Fig. 3-11 | - Comparação de métodos de estimação de $E[J]$ , para o nível $v = H_s/3$ .....   | 61 |
| Fig. 3-12 | - Variabilidade dos métodos de estimação de $E[J]$ , para o nível $v = H_s/2$ .....   | 61 |
| Fig. 3-13 | - Variabilidade dos métodos de estimação de $E[J]$ , para o nível $v = H_s/3$ .....   | 62 |
| Fig. 3-14 | - Análise de $E[G]$ para os níveis $v = H_s/2$ , $H_s/3$ e $H_s/4$ - método LH.....   | 62 |
| Fig. 3-15 | - Análise de $E[N_G]$ para os níveis $v = H_s/2$ , $H_s/3$ e $H_s/4$ - método LH .....  | 63 |
| Fig. 3-16 | - Análise de $E[J]$ para os níveis $v = H_s/2$ , $H_s/3$ e $H_s/4$ , utilizando os métodos REIA, DIR e KE - Espectro JONSWAP .....                                    | 64 |
| Fig. 3-17 | - Análise de $E[J]$ para os níveis $v = H_s/2$ , $H_s/3$ e $H_s/4$ , utilizando os métodos REIA, DIR e KE - Espectro P-M (ITTC).....                                  | 65 |
| Fig. 3-18 | - Análise de $E[J]$ para os níveis $v = H_s/2$ , $H_s/3$ e $H_s/4$ , utilizando os métodos REIA, DIR e KE - Espectro P-M generalizado .....                           | 66 |
| Fig. 3-19 | - Comparação dos parâmetros espectrais dos registos considerados .....  | 70 |
| Fig. 3-20 | - Relações entre diferentes parâmetros espectrais - Relação $Q_p$ - $Q_e$ .....   | 70 |
| Fig. 3-21 | - Relações entre diferentes parâmetros espectrais - Relação $\kappa$ - $r$ .....  | 71 |
| Fig. 3-22 | - Relações entre diferentes parâmetros espectrais - Relação $Q_p$ - $v$ .....   | 71 |
| Fig. 3-23 | - Relações entre $E[J]$ e $Q_p$ - Nível $H_s/2$ .....   | 73 |
| Fig. 3-24 | - Relações entre $E[J]$ e $Q_p$ - Nível $H_s/3$ .....   | 74 |
| Fig. 3-25 | - Relações entre $E[J]$ e $Q_e$ - Nível $H_s/2$ .....   | 74 |
| Fig. 3-26 | - Relações entre $E[J]$ e $Q_e$ - Nível $H_s/3$ .....   | 74 |
| Fig. 3-27 | - Relações entre $E[J]$ e $v$ - Nível $H_s/2$ .....   | 75 |
| Fig. 3-28 | - Relações entre $E[J]$ e $v$ - Nível $H_s/3$ .....   | 75 |
| Fig. 3-29 | - Relações entre $E[J]$ e $\kappa$ - Nível $H_s/2$ .....  | 75 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Fig. 3-30 | - Relações entre $E[J]$ e $\kappa$ - Nível $H_S/3$ .....   | 76  |
| Fig. 3-31 | - Relações entre $E[J]$ e $r$ - Nível $H_S/2$ .....  | 76  |
| Fig. 3-32 | - Relações entre $E[J]$ e $r$ - Nível $H_S/3$ .....  | 76  |
| Fig. 3-33 | - Comparação dos espectros dos registos simulado e em canal .....  | 78  |
| Fig. 3-34 | - Extracto de um registo em canal (registo bu820).....   | 79  |
| Fig. 3-35 | - Extracto de um registo simulado (registo sim820) com características idênticas às do registo da figura anterior.....   | 79  |
| Fig. 4-1  | - Exemplo de aplicação do programa SAM MOD 1-1 (Simulação Base Espectro).....  | 87  |
| Fig. 4-2  | - Extracto de uma envolvente, $V(t)$ , com a forma dos grupos de ondas de nível $v$ pretendidos .....  | 89  |
| Fig. 4-3  | - Definição da função $k(t)$ .....   | 91  |
| Fig. 4-4  | - "Sinusóide", $x(t)$ , de amplitude unitária e frequência modulada de acordo com a forma dos grupos de ondas de nível $v$ pretendidos.....  | 92  |
| Fig. 4-5  | - "Sinusóide", $y(t)$ , de frequência e amplitude moduladas de acordo com os grupos de ondas de nível $v$ pretendidos .....  | 92  |
| Fig. 4-6  | - Esquema para a iteração de $\eta(t)$ .....   | 93  |
| Fig. 4-7  | - Extracto do sinal, $\eta(t)$ , obtido após 3 iterações do método iterativo REIA, e correspondente à envolvente pretendida, $V(t)$ .....  | 94  |
| Fig. 4-8  | - Exemplo de um sinal qualquer, $\eta_A(t)$ , de espectro $S(f)$ .....   | 95  |
| Fig. 4-9  | - Envolvente $V_A(t)$ . Definição do nível $v$ e cálculo de $E[D]_A$ .....   | 96  |
| Fig. 4-10 | - Envolventes $V_A(t)$ e $V_B^*(t)$ . Cálculo de $E[D]_B$ e de $k_{FG}$ .....  | 96  |
| Fig. 4-11 | - Novo sinal, $\eta_B(t)$ , baseado em $S(f)$ , e na envolvente escalada, $V_B^*(t)$ .....   | 97  |
| Fig. 4-12 | - Comparação da envolvente escalada $V_B^*(t)$ com a envolvente efectiva $V_B(t)$ .....  | 97  |
| Fig. 4-13 | - Envolventes consideradas no ME.....  | 98  |
| Fig. 4-14 | - Sequência de procedimentos do Método da Escalagem (ME).....  | 99  |
| Fig. 4-15 | - Exemplo de aplicação do programa SAM MOD 1-2 (Simulação Base Espectro+GO).....   | 100 |
| Fig. 4-16 | - Comparação da envolvente inicial $V_A(t)$ com as envolventes escaladas, $V_{B1}(t)$ e $V_{B2}(t)$ , por forma a obter-se registos cujos valores de $E[J]$ sejam 50% e 100% maiores que o $E[J]$ inicial - Escalas temporais diferentes ..... | 101 |
| Fig. 4-17 | - Desvio entre $E[J]$ pretendido e $E[J]_{1.5}$ e $E[J]_2$ obtidos - Conjunto G1.....  | 102 |
| Fig. 4-18 | - Valores de $E[J]$ para diferentes níveis $v$ - Conjunto G1 .....   | 103 |
| Fig. 4-19 | - Valores de $E[J]$ para $g=3.3$ , $v=H_S/2$ - Conjunto G2 .....   | 103 |
| Fig. 4-20 | - Valores de $E[J]$ para $g=3.3$ , $v = H_S/3$ - Conjunto G2 .....   | 104 |
| Fig. 4-21 | - Médias de $E[J]$ para os níveis $H_S/2$ e $H_S/3$ - Conjunto G2 .....  | 104 |
| Fig. 4-22 | - Variação de parâmetros espectrais com $g = \gamma$ .....   | 105 |
| Fig. 4-23 | - Simulação condicionada - série inicial (não condicionada) com espectro $S(f)$ de JONSWAP, $H_S = 4 m$ e $T_p = 8 s$ .....  | 109 |
| Fig. 4-24 | - Simulação condicionada - sequência de 30 pontos a embeber na série inicial, não condicionada .....   | 110 |
| Fig. 4-25 | - Série condicionada, $\eta_c(t)$ , com espectro $S(f)$ da série não condicionada, $\eta_u(t)$ , e contendo a série dada, $\eta_e(t)$ .....  | 110 |
| Fig. 5-1  | - Aspecto geral do pavilhão de ensaios de hidráulica marítima do LNEC.....   | 114 |
| Fig. 5-2  | - Aspecto de um computador usado para a simulação, geração, aquisição de dados e controlo do batedor .....   | 115 |
| Fig. 5-3  | - Placas DAQ multifunções (MIO) da National Instruments.....   | 116 |
| Fig. 5-4  | - Aspecto de uma sonda resistiva utilizada nos ensaios .....   | 116 |
| Fig. 5-5  | - Representação esquemática da geração física de agitação em canal .....   | 119 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| Fig. 5-6  | - Exemplo do módulo SAM MOD 1-1 (Simulação Base Espectro) .....   | 123 |
| Fig. 5-7  | - Esquema de sondas utilizado no método SIRW .....  | 125 |
| Fig. 5-8  | - Esquema de sondas num dado canal.....   | 127 |
| Fig. 5-9  | - Interpolação de valores dos sinais nas sondas .....   | 140 |
| Fig. 5-10 | - Exemplo dos resultados da separação de espectros incidente e reflectido obtidos com o módulo SAM MOD 8 (Análise da Reflexão) .....  | 142 |
| Fig. 5-11 | - Excerto dos sinais simulados numericamente nas duas sondas para o Caso N1-S2 - JONSWAP, $Cr = 40\%$ .....   | 145 |
| Fig. 5-12 | - Espectro incidente inicial ( $S$ ) e espectros incidente ( $S_i$ ) e reflectido ( $S_r$ ) reconstituídos (alisados) para o Caso N1-S2 - JONSWAP, $Cr = 40\%$ .....                        | 146 |
| Fig. 5-13 | - Espectro incidente inicial ( $S$ ) e espectros incidente ( $S_i$ ) e reflectido ( $S_r$ ) reconstituídos (alisados) para o Caso N2-S2 - Pierson-Moskowitz ITTC, $Cr = 40\%$ .....         | 146 |
| Fig. 5-14 | - Espectro incidente inicial ( $S$ ) e espectros incidente ( $S_i$ ) e reflectido ( $S_r$ ) reconstituídos (alisados) para o Caso N3-S2 - Pierson-Moskowitz generalizado, $Cr = 40\%$ ..... | 147 |
| Fig. 5-15 | - Espectro incidente inicial ( $S$ ) e espectros incidente ( $S_i$ ) e reflectido ( $S_r$ ) reconstituídos (alisados) para o Caso N4-S2 - JONSWAP, $Cr = 80\%$ .....                        | 147 |
| Fig. 5-16 | - Excerto dos primeiros 60 s dos sinais simulados numericamente nas sondas S1, S2 e S3 - Caso N1-S3 - JONSWAP, $Cr = 40\%$ .....  | 149 |
| Fig. 5-17 | - Espectro incidente inicial ( $S$ ) e espectros incidente ( $S_i$ ) e reflectido ( $S_r$ ) reconstituídos (alisados) para o Caso N1-S3 - JONSWAP, $Cr = 40\%$ .....                        | 150 |
| Fig. 5-18 | - Espectro incidente inicial ( $S$ ) e espectros incidente ( $S_i$ ) e reflectido ( $S_r$ ) reconstituídos (alisados) para o Caso N2-S3 - Pierson-Moskowitz ITTC, $Cr = 40\%$ .....         | 150 |
| Fig. 5-19 | - Espectro incidente inicial ( $S$ ) e espectros incidente ( $S_i$ ) e reflectido ( $S_r$ ) reconstituídos (alisados) para o Caso N3-S3 - Pierson-Moskowitz generalizado, $Cr = 40\%$ ..... | 151 |
| Fig. 5-20 | - Espectro incidente inicial ( $S$ ) e espectros incidente ( $S_i$ ) e reflectido ( $S_r$ ) reconstituídos (alisados) para o Caso N4-S3 - JONSWAP, $Cr = 80\%$ .....                        | 151 |
| Fig. 5-21 | - Canal de ondas irregulares para a simulação física com 2 ou 3 sondas (dimensões em $m$ ).....   | 153 |
| Fig. 5-22 | - Excerto dos sinais obtidos nas 2 sondas - Caso F1-S2-SO - Espectro JONSWAP.....   | 155 |
| Fig. 5-23 | - Espectro pretendido e espectros incidente e reflectido reconstituídos (alisados) - Caso F1-S2-SO - Espectro JONSWAP .....   | 155 |
| Fig. 5-24 | - Espectro pretendido e espectros incidente e reflectido reconstituídos (alisados) - Caso F3-S2-SO - Espectro Pierson-Moskowitz generalizado .....  | 156 |
| Fig. 5-25 | - Espectro pretendido e espectros incidente e reflectido reconstituídos (alisados) - Caso F1-S3-CO - Espectro JONSWAP - 3 Sondas, Com Obra.....   | 159 |
| Fig. 5-26 | - Espectro pretendido e espectros incidente e reflectido reconstituídos (alisados) - Caso F2-S3-CO - Espectro Pierson-Moskowitz (ITTC) - 3 Sondas, Com Obra.....                            | 159 |
| Fig. 5-27 | - Espectro pretendido e espectros incidente e reflectido reconstituídos (alisados) - Caso F3-S3-CO - Espectro Pierson-Moskowitz generalizado - 3 Sondas, Com Obra .....                     | 160 |
| Fig. 5-28 | - Espectro pretendido e espectros incidente e reflectido reconstituídos (alisados) - Caso F2-S3-SO - Espectro Pierson-Moskowitz (ITTC) - 3 Sondas, Sem Obra.....                            | 160 |
| Fig. 5-29 | - Espectro pretendido e espectros incidente e reflectido reconstituídos (alisados) - Caso F2-S2-CO - Espectro Pierson-Moskowitz (ITTC) - 2 Sondas, Com Obra.....                            | 161 |
| Fig. 5-30 | - Espectro pretendido e espectros incidente e reflectido reconstituídos (alisados) - Caso F2-S2-SO - Espectro Pierson-Moskowitz (ITTC) - 2 Sondas, Sem Obra.....                            | 161 |
| Fig. 5-31 | - Canal de ondas irregulares usado nas simulações físicas com vista à determinação da reflexão em praia de $45^\circ$ de inclinação (dimensões em $m$ ) .....                               | 163 |
| Fig. 5-32 | - Espectro pretendido e espectros incidente e reflectido reconstituídos (alisados). Caso JW12-40 .....  | 167 |
| Fig. 5-33 | - Espectro pretendido e espectros incidente e reflectido reconstituídos (alisados). Caso JW16-40 .....  | 168 |
| Fig. 5-34 | - Esquema do canal (COI 1) usado nos ensaios (dimensões em $m$ ).....   | 177 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| Fig. 5-35 | - Esquema de procedimentos (Situação A).....  | 178 |
| Fig. 5-36 | - Esquema de procedimentos (Situação B).....  | 179 |
| Fig. 5-37 | - Pormenor dos perfis PS1, PS2 e PS2R.....  | 181 |
| Fig. 5-38 | - Coeficientes de reflexão a partir das sondas S2, S4 e S5.....   | 182 |
| Fig. 5-39 | - Painel da separação da agitação incidente e reflectida para o perfil PS3 .....  | 183 |
| Fig. 5-40 | - Comparação PS5 – (150-180 s) - Situação A, para as Sondas S1, S2 e S3 .....   | 184 |
| Fig. 5-41 | - Espectros do perfil (PS5) pretendido e dos perfis obtidos nas sondas S1, S2 e S3 .....  | 185 |
| Fig. 5-42 | - Comparação PS3 – (250-280 s) - Situação A, para as Sondas S1, S2 e S3 .....   | 185 |
| Fig. 5-43 | - Espectros do perfil (PS3) pretendido e dos perfis obtidos nas sondas S1, S2 e S3 .....  | 186 |
| Fig. 5-44 | - Comparação PS3 – (60-90 s) - Situação A, para as Sondas S1, S2 e S3.....  | 186 |
| Fig. 5-45 | - Comparação PS5 – (150-180 s) - Situação B, para as Sondas S1, S2 e S3 .....   | 189 |
| Fig. 5-46 | - Comparação PS3 – (250-280 s) - Situação B, para as Sondas S1, S2 e S3 .....   | 189 |
| Fig. 5-47 | - Comparação PS3 – (60-90 s) - Situação B, para as Sondas S1, S2 e S3.....  | 190 |
| Fig. 5-48 | - Comparação do perfil pretendido (PS3A) com o perfil obtido na sonda S1 - Situação B (0-50 s) .....  | 192 |
| Fig. 5-49 | - Comparação do perfil pretendido (PS3A) com o perfil obtido na sonda S1 - Situação B (50-100 s).....   | 192 |
| Fig. 5-50 | - Comparação do perfil pretendido (PS3A) com o perfil obtido na sonda S1 - Situação B (130-180 s).....  | 193 |
| Fig. 5-51 | - Comparação total do perfil pretendido (PS3A) com o perfil obtido na sonda S1 - Situação B.....  | 193 |
| Fig. 6-1  | - Estrutura do pacote de <i>software</i> SAM (Simulação da Agitação Marítima).....  | 204 |
| Fig. 6-2  | - Estrutura do módulo SAM MOD 1 (Simulação Numérica) .....  | 204 |
| Fig. 6-3  | - Estrutura do módulo SAM MOD 9 (Utilidades) .....  | 204 |
| Fig. 6-4  | - Pormenor de um programa em G (extensão .vi), em ambiente LabVIEW .....  | 205 |
| Fig. 6-5  | - Chamada do menu de ajuda geral de cada módulo .....   | 208 |
| Fig. 6-6  | - Chamada do menu de execução dos módulos .....   | 208 |
| Fig. 6-7  | - Menu de ajuda geral do pacote SAM .....   | 209 |
| Fig. 6-8  | - Menus de ajuda geral através de indexação ( <i>index</i> ) ou de palavra-chave ( <i>keyword</i> ).....  | 210 |
| Fig. 6-9  | - Exemplo de conteúdo de um tópico do menu com <i>hiperligação</i> a sub-tópico .....   | 210 |
| Fig. 6-10 | - Menu de ajuda de execução de um painel.....   | 211 |
| Fig. 6-11 | - Várias ferramentas de visualização de gráficos do LabVIEW (aplicação de <i>zoom</i> , inclusão de cursor e características das curvas).....         | 212 |
| Fig. 6-12 | - Autenticação do utilizador do pacote de <i>software</i> SAM .....   | 212 |
| Fig. 6-13 | - Aspecto inicial do painel-janela do <i>software</i> SAM MOD (Interface).....  | 213 |
| Fig. 6-14 | - Exemplo de um painel-janela típico do <i>software</i> SAM MOD (Interface).....  | 214 |
| Fig. 6-15 | - Aspecto das opções de execução do módulo SAM MOD (Interface) para as duas possibilidades de instalação (SAM1.exe e SAM2.exe, respectivamente) ..... | 214 |
| Fig. 6-16 | - Aspecto inicial do painel SAM MOD 1 (Simulação Numérica) .....  | 215 |
| Fig. 6-17 | - Painel-janela típico do <i>software</i> SAM MOD 1-1 (Simulação Base Espectro) .....   | 217 |
| Fig. 6-18 | - Aspecto inicial do painel SAM MOD 1-2 (Simulação Base Espectro+GO) .....  | 218 |
| Fig. 6-19 | - Painel-janela típico do <i>software</i> SAM MOD 1-3 (Perfil Dado) .....   | 219 |
| Fig. 6-20 | - Aspecto inicial do painel SAM MOD 2 (Aquisição na Água) .....   | 221 |
| Fig. 6-21 | - Painel-janela típico do <i>software</i> SAM MOD 3 (Geração e Aquisição) .....   | 222 |
| Fig. 6-22 | - Aspecto do painel do SAM MOD 4 (Simulação, Geração e Aquisição).....  | 224 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| Fig. 6-23 | - Aspecto do painel SAM MOD 5 (Calibração de Sondas).....   | 225 |
| Fig. 6-24 | - Aspecto do painel SAM MOD 6 (Controlo do Batedor).....  | 226 |
| Fig. 6-25 | - Painel de controlo do actuador do batedor.....  | 226 |
| Fig. 6-26 | - Aspecto do painel SAM MOD 7 (Análise Espectral).....  | 227 |
| Fig. 6-27 | - Aspecto do painel SAM MOD 8 (Análise da Reflexão).....  | 228 |
| Fig. 6-28 | - Aspecto do painel SAM MOD 9-1 (Criação de Espectro Empírico).....   | 229 |
| Fig. 6-29 | - Aspecto do painel SAM MOD 9-2 (Comparação de Registos).....   | 229 |
| Fig. 6-30 | - Aspecto do painel SAM MOD 9-3 (Detecção de Cristas em Registos).....  | 230 |
| Fig. 6-31 | - Aspecto do painel SAM MOD 9-4 (Caracterização de Grupos de Onda).....   | 230 |
| Fig. 6-32 | - Exemplo nº 1 - Criação de Espectro Empírico.....  | 231 |
| Fig. 6-33 | - Exemplo nº 2 - Simulação numérica de um registo com base num dado espectro empírico.....  | 232 |
| Fig. 6-34 | - Exemplo nº 3 - Simulação numérica de um registo com espectro empírico e agrupamento de ondas ( $E[J]$ ) dados.....                  | 233 |
| Fig. 6-35 | - Exemplo nº 4: Determinação de um ficheiro de comando para o batedor, por forma a obter um dado perfil na água.....                  | 234 |
| Fig. 6-36 | - Exemplo nº 5: Geração de um ficheiro de comando na água e correspondente aquisição.....   | 235 |
| Fig. 6-37 | - Exemplo nº 6: Análise espectral de um registo.....  | 236 |
| Fig. 6-38 | - Exemplo nº 7: Análise da reflexão.....  | 237 |
| Fig. A-1  | - Espectros de JONSWAP ( $\gamma=3.3$ ) e P-M Gen., com $H_s = 0.1 m$ e $T_p = 1.13 s$ , e espectro P-M ITTC, com $H_s = 0.1 m$ ..... | 277 |
| Fig. A-2  | - Espectros de JONSWAP ( $\gamma=3.3$ ) e P-M Gen., com $H_s = 0.1 m$ e $T_p = 1.41 s$ , e espectro P-M ITTC, com $H_s = 0.1 m$ ..... | 277 |
| Fig. A-3  | - Espectros de JONSWAP ( $\gamma=3.3$ ) e P-M Gen., com $H_s = 0.1 m$ e $T_p = 1.70 s$ , e espectro P-M ITTC, com $H_s = 0.1 m$ ..... | 278 |
| Fig. A-4  | - Fase, $\theta$ , e deslocamento, $\delta$ , da onda incidente para $a = 1$ e $L = 20$ .....   | 285 |
| Fig. A-5  | - Reflexão de onda em função da distância, $l$ , do ponto considerado (abscissa 0) ao obstáculo.....                                  | 286 |





# ÍNDICE DE QUADROS

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Quadro 3-1  | - Características pretendidas e obtidas dos registos analisados .....   | 52  |
| Quadro 3-2  | - Resultados da caracterização de grupos de ondas - registos 1 a 5.....   | 54  |
| Quadro 3-3  | - Resultados da caracterização de grupos de ondas - registos 6 a 10.....  | 55  |
| Quadro 3-4  | - Resultados da caracterização de grupos de ondas - registos 11 a 15 .....  | 56  |
| Quadro 3-5  | - Resultados da caracterização de grupos de ondas - registos 16 a 20 .....  | 57  |
| Quadro 3-6  | - Características dos registos simulados numericamente .....  | 63  |
| Quadro 3-7  | - Análise de grupos de ondas em registos simulados – JONSWAP .....  | 64  |
| Quadro 3-8  | - Análise de grupos de ondas em registos simulados – P-M (ITTC) .....   | 65  |
| Quadro 3-9  | - Análise de grupos de ondas em registos simulados – P-M generalizado.....  | 66  |
| Quadro 5-1  | - Relações entre protótipo e modelo .....   | 118 |
| Quadro 5-2  | - Dados da Simulação Numérica - Método das 2 sondas.....  | 144 |
| Quadro 5-3  | - Casos de Simulação Numérica - Método das 2 sondas .....   | 145 |
| Quadro 5-4  | - Dados da Simulação Numérica - Método das $M (=3)$ sondas.....   | 148 |
| Quadro 5-5  | - Casos de Simulação Numérica - Método das $M (=3)$ sondas .....  | 149 |
| Quadro 5-6  | - Dados da Simulação Física - Método das 2 sondas .....   | 154 |
| Quadro 5-7  | - Casos da Simulação Física - Método das 2 sondas.....  | 154 |
| Quadro 5-8  | - Dados da Simulação Física - Método das $M (=3)$ sondas, Com Obra .....  | 156 |
| Quadro 5-9  | - Casos de Simulação Física - Método das $M (=3)$ sondas, CO.....   | 157 |
| Quadro 5-10 | - Dados da Simulação Física - Método das $M (=3)$ sondas, SO .....  | 157 |
| Quadro 5-11 | - Casos de Simulação Física - Método das $M (=3)$ sondas, SO.....   | 158 |
| Quadro 5-12 | - Dados da Simulação Física - Método das $M (=2)$ sondas .....  | 158 |
| Quadro 5-13 | - Casos da Simulação Física - Método das $M (=2)$ sondas.....   | 158 |
| Quadro 5-14 | - Coeficientes de reflexão das simulações físicas .....   | 162 |
| Quadro 5-15 | - Parâmetros dos espectros utilizados.....  | 164 |
| Quadro 5-16 | - Dados dos sinais gerados.....   | 164 |
| Quadro 5-17 | - Características do canal e condições de ensaio .....  | 165 |
| Quadro 5-18 | - Características dos ensaios: espectro JONSWAP ( $\gamma = 3.3$ ) .....  | 166 |
| Quadro 5-19 | - Características dos ensaios: espectro Pierson-Moskowitz .....   | 167 |
| Quadro 5-20 | - Coeficientes de reflexão para os casos ensaiados.....   | 168 |
| Quadro 5-21 | - Altura significativa. Caso JW16-40 .....  | 169 |
| Quadro 5-22 | - Período médio. Caso JW16-40 .....   | 169 |
| Quadro 5-23 | - Características dos registos simulados (pretendidos).....   | 181 |
| Quadro 5-24 | - Comparações entre perfis pretendido e obtido – Situação A .....   | 187 |
| Quadro 5-25 | - Comparações entre perfis pretendido e obtido – Situação B .....   | 191 |
| Quadro A-1  | - Deslocamentos para diferentes fases da onda incidente.....  | 285 |
| Quadro A-2  | - Extracto dos resultados SIMCOND – Simulação Condicionada.....   | 291 |
| Quadro A-3  | - Extracto dos valores do espectro incidente inicial ( $S$ ), do espectro incidente reconstituído alisado ( $S_i$ ), do espectro reflectido reconstituído alisado ( $S_r$ ) e do coeficiente de reflexão ( $r_k$ ) para a simulação do Caso N1-S2 ( $k = 51$ a $150$ )..... | 292 |

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| Quadro A-4 | - Extracto dos valores do espectro incidente inicial ( $S$ ), do espectro incidente reconstituído alisado ( $S_i$ ), do espectro reflectido reconstituído alisado ( $S_r$ ) e do coeficiente de reflexão ( $r_k$ ) para a simulação do Caso N1-S3 ( $k = 51$ a $150$ ).....        | 293 |
| Quadro A-5 | - Extracto dos valores do espectro pretendido inicial ( $S$ ), do espectro incidente reconstituído alisado ( $S_i$ ), do espectro reflectido reconstituído alisado ( $S_r$ ) e do coeficiente de reflexão ( $r(f)$ ) para a simulação do Caso F1-S2-SO ( $k = 151$ a $250$ ) ..... | 297 |
| Quadro A-6 | - Extracto dos valores do espectro pretendido inicial ( $S$ ), do espectro incidente reconstituído alisado ( $S_i$ ), do espectro reflectido reconstituído alisado ( $S_r$ ) e do coeficiente de reflexão ( $r(f)$ ) para a simulação do Caso F1-S3-CO ( $k = 101$ a $200$ ) ..... | 298 |

# ÍNDICE REMISSIVO

## A

|                   |   |
|-------------------|---|
| análise           |   |
| curto prazo ..... | 8 |
| longo prazo.....  | 8 |

## B

|                           |                    |
|---------------------------|--------------------|
| batedor                   |                    |
| compensação .....         | 171                |
| ganho .....               | 164, 170, 179, 180 |
| ganho óptimo.....         | 164, 182           |
| movimento horizontal..... | 119                |

## C

|  |     |
|--|-----|
| cadeia de Markov .....                   | 33  |
| chorrilho                                |     |
| número de ondas.....                     | 31  |
| chorrilho total                          |     |
| número de ondas.....                     | 36  |
| coeficiente                              |     |
| de correlação (aproximação) de Battjes . | 68  |
| reflexão.....                            | 136 |
| conversor ADC .....                      | 116 |
| convolução .....                         | 271 |

## D

|                              |                |
|------------------------------|----------------|
| declividade de grupo         |                |
| espacial.....                | 48             |
| temporal .....               | 48             |
| desvio médio quadrático..... | 177            |
| diferença de fase.....       | 175            |
| distribuição                 |                |
| conjunta.....                | 8              |
| das durações.....            | 49             |
| exponencial .....            | 41, 47, 48, 49 |
| geométrica .....             | 31, 50         |

|  |                  |
|--|------------------|
| Normal.....                                  | 12               |
| Rayleigh.....                                | 17, 36, 281, 282 |
| Weibull .....                                | 282              |
| DSA .....                                    | Ver MFA          |
| duração do grupo de ondas de nível $v$ ..... | 48               |

## E

|                                      |                 |
|--------------------------------------|-----------------|
| EIA .....                            | Ver método REIA |
| envolvente                           |                 |
| de Hilbert .....                     | 44              |
| de Rice .....                        | 42              |
| de Rice/Hilbert.....                 | 44, 53          |
| de Rice/Hilbert alisada.....         | 53              |
| REIA.....                            | 53              |
| teórica .....                        | 53              |
| escala                               |                 |
| espaço .....                         | 118             |
| tempo.....                           | 118             |
| espectro                             |                 |
| bilateral .....                      | 19, 23          |
| centróide.....                       | 21              |
| cruzado.....                         | 19              |
| definição .....                      | 19              |
| estimação pelo método directo .....  | 20              |
| estimação pelo método indirecto..... | 20              |
| incidente .....                      | 135             |
| incidente alisado.....               | 136             |
| janela .....                         | 136             |
| JONSWAP .....                        | 276             |
| largura.....                         | 21, 276         |
| momentos .....                       | 21              |
| parâmetros.....                      | 21              |
| Pierson-Moskowitz .....              | 275             |
| Pierson-Moskowitz (ITTC) .....       | 275             |
| Pierson-Moskowitz generalizado.....  | 276             |
| reflectido.....                      | 135             |
| reflectido alisado .....             | 136             |

|                               |              |
|-------------------------------|--------------|
| unilateral.....               | 19           |
| variância .....               | Ver espectro |
| <b>F</b>                      |              |
| factor                        |              |
| de agrupamento .....          | Ver GF       |
| de escalagem .....            | 96, 98, 99   |
| filtro                        |              |
| digital .....                 | 125          |
| função de ganho.....          | 123          |
| frequência                    |              |
| de aquisição.....             | 116, 221     |
| de geração .....              | 223          |
| de Nyquist .....              | 268          |
| dominante .....               | 43           |
| <b>G</b>                      |              |
| geração/aquisição             |              |
| placa .....                   | 115          |
| GF.....                       | 45, 68       |
| grupos de ondas               |              |
| definição .....               | 88           |
| distribuição da duração.....  | 41           |
| duração (ENV).....            | 41           |
| número .....                  | 42           |
| número médio (KE).....        | 35           |
| número médio (LH).....        | 42, 283      |
| número médio (MC) .....       | 32           |
| <b>H</b>                      |              |
| hipótese                      |              |
| exponencialidade .....        | 41           |
| linearidade do sistema.....   | 118          |
| <b>I</b>                      |              |
| intervalo de amostragem ..... | 116          |

## M

|                        |                             |
|------------------------|-----------------------------|
| método                 |                             |
| 2 sondas .....         | 130, 144, 153, 158          |
| chorrilhos .....       | 29, 31                      |
| directo .....          | 29, 58                      |
| EIA/SIWEH .....        | 45                          |
| envolvente .....       | 28, 29, 39                  |
| escalagem (ME).....    | 95                          |
| filtragem digital..... | 85                          |
| Kimura.....            | 33                          |
| Kimura espectral ..... | 37                          |
| Kimura-Battjes.....    | Ver método Kimura espectral |
| LH .....               | 30, 42, 80                  |
| M sondas.....          | 131, 148, 156, 158, 165     |
| REIA.....              | 46, 89, 98                  |
| MFA .....              | 86, 122                     |
| modelação .....        | 7                           |
| modelo                 |                             |
| determinístico .....   | 6                           |
| físico .....           | 6                           |
| híbrido .....          | 7                           |
| matemático .....       | 6                           |
| numérico.....          | 6                           |
| probabilístico .....   | 6                           |

## N

|                            |         |
|----------------------------|---------|
| nível de agrupamento ..... | 27      |
| NSA .....                  | 84      |
| número de onda.....        | 24, 173 |

## O

|                            |             |
|----------------------------|-------------|
| onda                       |             |
| altura máxima.....         | 17          |
| altura média .....         | 17          |
| altura significativa ..... | 17, 21, 137 |
| amplitude.....             | 24, 126     |
| celeridade .....           | 26, 173     |
| comprimento .....          | 126         |

|                               |                         |                                 |                        |
|-------------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------|
| crista a crista .....         | 14                      | controles .....                 | 301                    |
| definição .....               | 14, 17                  | execução .....                  | 207                    |
| direcção .....                | 17                      | indicadores .....               | 301                    |
| falsa .....                   | 16                      | instalação .....                | 207                    |
| grupos .....                  | 27                      | menus de ajuda geral .....      | 209                    |
| longa ligada .....            | 27                      | menus de execução .....         | 211                    |
| orbital .....                 | 15                      | painel .....                    | 203                    |
| período .....                 | 17, 126                 | versões .....                   | 207                    |
| período médio .....           | 21                      | série temporal .....            | 8                      |
| progressiva .....             | 126, 127                | simulação .....                 | 7                      |
| teoria linear .....           | 23                      | condicionada .....              | 106                    |
| zero ascendente .....         | 14                      | física .....                    | 7                      |
| zero descendente .....        | 15                      | numérica .....                  | 7, 83                  |
| <b>P</b>                      |                         | sinal .....                     | 7                      |
| parâmetro                     |                         | análise harmónica .....         | 267                    |
| de Battjes .....              | 68                      | periódico .....                 | 267                    |
| de Goda .....                 | 68                      | sistema                         |                        |
| de Longuet-Higgins .....      | 68                      | definição .....                 | 21                     |
| de Medina e Hudspeth .....    | 68                      | entrada .....                   | 21                     |
| potencial de velocidade ..... | 24                      | excitação .....                 | Ver entrada de sistema |
| processo estocástico .....    | 11                      | função resposta a impulso ..... | 22, 195                |
| autocovariância .....         | 19                      | função transferência .....      | 22                     |
| ergódico .....                | 12                      | ganho .....                     | 23, 120, 121           |
| estacionário .....            | 12                      | invariante .....                | 22                     |
| normal .....                  | 12                      | linear .....                    | 22, 118                |
| Poisson .....                 | 283                     | sonda .....                     | 116                    |
|                               |                         | constante característica .....  | 220                    |
| <b>R</b>                      |                         | <b>T</b>                        |                        |
| reflexão                      |                         | Teorema limite central .....    | 12                     |
| coeficiente .....             | 124, 143, 152, 169, 182 | Transformada                    |                        |
| registo .....                 | 7                       | Fourier .....                   | 22                     |
| duração .....                 | 13                      | Hilbert .....                   | 15, 80, 271            |
| re-reflexão .....             | 124, 128, 165, 170, 171 | <b>V</b>                        |                        |
| ruído branco .....            | 83, 123                 | velocidade angular .....        | 24                     |
| <b>S</b>                      |                         |                                 |                        |
| SAM                           |                         |                                 |                        |



# SIMBOLOGIA

|                 |   |
|-----------------|---|
| $\alpha_p$      | - constante de Phillips   |
| $\beta_k$       | - amplitude de sinusóide  |
| $\delta$        | - deslocamento de onda  |
| $\delta_t$      | - declividade temporal de grupo   |
| $\delta_x$      | - declividade espacial de grupo   |
| $\Delta t$      | - intervalo de digitalização  |
| $\varepsilon$   | - parâmetro de Cartwright e Longuet-Higgins, 1956   |
| $\phi_k$        | - fase da sinusóide correspondente à frequência harmónica $k$ , retirada de um conjunto de valores independentes de uma variável aleatória uniformemente distribuída entre $0$ e $2\pi$ |
| $\phi(x, z, t)$ | - função potencial de velocidade  |
| $\varphi$       | - fase  |
| $\gamma$        | - largura espectral, ou factor de reforço do pico do espectro de JONSWAP  |
| $\gamma_n$      | - fase  |
| $\eta(t)$       | - registo temporal, elevação da superfície do mar num dado ponto, em função do tempo  |
| $\eta(x)$       | - registo espacial, elevação da superfície do mar num dado instante, em função do espaço  |
| $\eta^*(t)$     | - registo reconstituído a partir da Transformada de Fourier (TF)  |
| $\hat{\eta}(t)$ | - Transformada de Hilbert (TH) de $\eta(t)$   |
| $\eta_c(t)$     | - série temporal condicionada   |
| $\eta_e(t)$     | - série determinística de ondas   |
| $\eta_u(t)$     | - série temporal não condicionada   |
| $\varphi_{nk}$  | - diferença de fase, para cada sinusóide $k$ , devido ao trajecto desde a sonda $n$ a um obstáculo e volta  |
| $\kappa$        | - parâmetro adimensional dependente do coeficiente de correlação entre as variáveis (Battjes, 1974 e Battjes e Vledder, 1984)   |
| $\lambda$       | - frequência angular  |
| $\nu$           | - parâmetro adimensional de largura do espectro (Longuet-Higgins, 1984)   |
| $\Pi$           | - matriz de $1^{\text{a}}$ transição que relaciona as distribuições referentes a uma onda com a seguinte  |
| $\theta$        | - fase da onda  |
| $\Theta$        | - direcção média da onda num registo  |
| $g$             | - desvio-padrão   |
| $\tau$          | - intervalo de tempo  |
| $\omega$        | - frequência angular da onda  |
| $\psi$          | - fase  |

- $a$  - amplitude de uma sinusóide
- $a$  - escala geométrica
- $a_k$  - coeficiente de Fourier
- $A( )$  - componente da função envolvente definida em Rice, 1954
- $b$  - amplitude de uma sinusóide
- $b_k$  - coeficiente de Fourier
- $B( )$  - componente da função envolvente definida em Rice, 1954
- $c$  - constante
- $c$  - celeridade ou velocidade de fase
- $c(\tau)$  - autocovariância
- $c_k$  - coeficiente de Fourier
- $c_k$  - covariância no ponto  $|k|\Delta t$
- $Cr$  - coeficiente de reflexão constante
- $d$  - profundidade
- $dbo$  - distância entre o batedor e um objecto reflector
- $d_0$  - parâmetro de localização da função exponencial
- $D$  - duração da excursão superior da envolvente; duração de cada grupo de ondas; intervalo de tempo, durante o qual as cristas das ondas se mantêm acima de  $v$  (ponto de vista contínuo)
- $\bar{D}$  - valor médio da duração dos grupos de ondas
- $D_c$  - intervalo de tempo
- $D_{MQ}$  - desvio médio quadrático
- $D_{MQM}$  - desvio médio quadrático mínimo
- $e(f)$  - função do ganho do sistema
- $e(t)$  - função da raiz quadrada da energia instantânea alisada
- $E( )$  - integral elíptico completo de 1ª espécie
- $E[ ]$  - valor médio ou esperança matemática
- $E(t)$  - função de energia instantânea alisada, de Funke e Mansard, 1979
- $f$  - frequência
- $\bar{f}$  - centróide do espectro
- $f_a$  - frequência de aquisição
- $f_c$  - frequência de corte do espectro
- $f_d$  - frequência dominante
- $f_k$  - frequência, para cada harmónica  $k$ , com um valor aleatório dentro de cada intervalo  $\Delta f_k$
- $f_{max}$  - frequência máxima do espectro
- $f_{med}$  - frequência média do espectro
- $f_p$  - frequência de pico do espectro
- $f( )$  - função densidade de probabilidade (de uma ou duas variáveis)
- $F$  - intervalo de tempo durante o qual a envolvente se mantêm abaixo do nível  $v$  (excursão inferior), entre dois grupos de ondas



|           |  |
|-----------|--|
| $F( )$    | - função de distribuição   |
| $g$       | - aceleração da gravidade  |
| $G$       | - número de ondas entre dois começos sucessivos de grupos de ondas   |
| $G$       | - ganho do batedor   |
| $G_{OPT}$ | - ganho óptimo do batedor  |
| $GF$      | - factor de agrupamento ( <i>groupiness factor</i> ) de Funke e Mansard, 1979  |
| $h_r$     | - altura média quadrática  |
| $h(t)$    | - função de resposta a impulso   |
| $H$       | - altura de onda   |
| $\bar{H}$ | - altura média das ondas num registo   |
| $H_c$     | - altura de onda de nível $v$ do agrupamento de ondas  |
| $H_I$     | - altura significativa de onda do sinal incidente  |
| $H_{max}$ | - altura máxima de onda num registo  |
| $H_{min}$ | - altura mínima de onda num registo  |
| $H_R$     | - altura significativa de onda do sinal reflectido   |
| $H_s$     | - altura significativa de onda de um registo   |
| $H_{SO}$  | - altura significativa obtida  |
| $H_{ST}$  | - altura significativa pretendida  |
| $H(f)$    | - função de transferência do sistema   |
| $i$       | - índice   |
| $i$       | - número inteiro   |
| $i_{RR}$  | - índice de re-reflexão  |
| $int(x)$  | - parte inteira de $x$   |
| $I(t)$    | - função raio-vector da onda orbital   |
| $I_k$     | - amplitude, para cada harmónica $k$ , do sinal incidente  |
| $I_0( )$  | - função de Bessel modificada de ordem zero  |
| $j$       | - índice   |
| $J$       | - número de ondas em cada grupo de onda; número de ondas contido numa sucessão de ondas cujas cristas estão acima de $v$ (ponto de vista discreto) |
| $k$       | - índice da sinusóide  |
| $k$       | - número de onda   |
| $k_{FG}$  | - factor de escalagem  |
| $k(t)$    | - função auxiliar do método iterativo REIA   |
| $K( )$    | - integral elíptico completo de 2ª espécie   |
| $l$       | - distância de uma sonda a um obstáculo reflector da onda incidente  |
| $L$       | - comprimento de onda  |
| $L_0$     | - comprimento de onda ao largo (em águas profundas)  |
| $m$       | - índice   |
| $m$       | - parâmetro do método iterativo REIA   |
| $m_n$     | - momento de ordem $n$ do espectro de $\eta(t)$  |

|                |  |
|----------------|--|
| $m'_n$         | - momento de ordem $n$ do espectro de $E(t)$   |
| $m_{0I}$       | - momento de ordem zero do espectro incidente  |
| $m_{0P}$       | - momento de ordem zero do espectro pretendido   |
| $M$            | - número de sondas   |
| $n$            | - índice   |
| $n$            | - número de ordem  |
| $N$            | - número de pontos do registo  |
| $N$            | - número de sinusóides consideradas na definição do espectro   |
| $N_G$          | - número de grupos de ondas de nível $v$ de um registo   |
| $N_z$          | - número de cruzamentos ascendentes da envolvente por unidade de tempo   |
| $N(t)$         | - processo estocástico de Poisson  |
| $p$            | - probabilidade de êxito   |
| $p( )$         | - função de probabilidade, densidade de probabilidade  |
| $P(n, m)$      | - distribuição probabilística de $H_n$ pelos estados, condicionada à de $H_m$  |
| $p_{ij}(n, m)$ | - probabilidade de $H_n$ estar no estado $i$ , sabendo que $H_m$ está no estado $j$                                    |
| $p_x(f)$       | - espectro bilateral do sinal de entrada, $x(t)$   |
| $p_y(f)$       | - espectro bilateral do sinal de saída, $y(t)$   |
| $p_{xy}(f)$    | - espectro cruzado de $x(t)$ e $y(t)$  |
| $q$            | - probabilidade de fracasso  |
| $q( )$         | - função de probabilidade  |
| $Q$            | - intervalo de tempo entre cruzamentos ascendentes do nível $v$ (excursão total) por parte da envolvente               |
| $Q_e$          | - parâmetro adimensional de largura do espectro (Medina e Hudspeth, 1987)  |
| $Q_p$          | - parâmetro adimensional de largura do espectro (Goda, 1970)   |
| $Q(\tau)$      | - janela temporal  |
| $r$            | - constante  |
| $r$            | - coeficiente de correlação entre alturas sucessivas; sua aproximação a partir de informação espectral (Battjes, 1974) |
| $r$            | - coeficiente de reflexão das ondas regulares  |
| $R$            | - coeficiente de correlação linear   |
| $r_0$          | - coeficiente de reflexão global, calculado a partir das energias reflectida e incidente                               |
| $r_k$          | - coeficiente de reflexão para a harmónica $k$   |
| $r_m$          | - coeficiente de correlação de ordem $m$ das alturas de onda de um registo   |
| $r(f)$         | - função coeficiente de reflexão   |
| $r(t)$         | - função registo ou realização   |
| $R_k$          | - amplitude, para cada harmónica $k$ , do sinal reflectido   |
| $R(t)$         | - função envolvente de um registo ou realização (envolvente Rice/Hilbert)  |
| $s_k$          | - amplitude da sinusóide correspondente à frequência harmónica $k$   |
| $S^*$          | - espectro efectivamente obtido na água do canal   |
| $S_i$          | - espectro incidente reconstituído alisado   |

|             |   |
|-------------|---|
| $S_{inc}$   | - espectro incidente reconstituído  |
| $S(f)$      | - espectro unilateral, função de densidade espectral                                    |
| $S_m(f)$    | - espectro de variância no modelo   |
| $S_p(f)$    | - espectro de variância no protótipo  |
| $S_x(f)$    | - espectro unilateral do sinal de entrada, $x(t)$                                       |
| $S_y(f)$    | - espectro unilateral do sinal de saída, $y(t)$   |
| $S_{xy}(f)$ | - espectro unilateral cruzado de $x(t)$ e $y(t)$  |
| $S_r$       | - espectro reflectido reconstituído alisado   |
| $S_{ref}$   | - espectro reflectido reconstituído   |
| $S_u(f)$    | - espectro de série temporal não condicionada   |
| $t$         | - tempo   |
| $t_s$       | - tempo necessário para que uma onda de período $T$ percorra a distância $s$            |
| $T$         | - período de onda   |
| $\bar{T}$   | - período de onda médio   |
| $T_{max}$   | - período máximo de um registo  |
| $T_p$       | - período de pico do espectro   |
| $T_v$       | - intervalo entre cruzamentos ascendentes do nível $v$                                  |
| $T_M$       | - semi-largura da janela temporal   |
| $T_R$       | - duração do registo  |
| $T_Z$       | - período médio de zero ascendente de um registo  |
| $TF[ ]$     | - Transformada de Fourier   |
| $TH[ ]$     | - Transformada de Hilbert   |
| $u$         | - componente horizontal da velocidade das partículas da água                            |
| $U_v$       | - número, por unidade de tempo, de cruzamentos ascendentes do nível $v$ pela envolvente |
| $U_{19.5}$  | - velocidade do vento num ponto $19.5 m$ acima da superfície do mar                     |
| $v$         | - nível de grupo ou agrupamento   |
| $v.a.$      | - variável aleatória  |
| $var[ ]$    | - variância   |
| $V(t)$      | - função envolvente genérica  |
| $W$         | - função de transformação   |
| $x$         | - abcissa   |
| $x_{ij}$    | - distância entre a sonda $i$ e a sonda $j$   |
| $x(t)$      | - função excitação, função do movimento horizontal do batedor, sinal de entrada         |
| $X$         | - matriz-solução  |
| $X$         | - deslocamento total do batedor de um gerador do tipo pistão                            |
| $X(t)$      | - processo estocástico  |
| $X_n(t)$    | - função da elevação da superfície na sonda $n$   |
| $y(t)$      | - função resposta a excitação, sinal de saída   |
| $Y(t)$      | - processo estocástico  |

- $z$  - ordenada contada do nível médio da superfície da água
- $z(t)$  - registo obtido na água numa qualquer sonda
- $z(x, t)$  - função de onda progressiva
- $Z(t)$  - processo estocástico

# LISTA DE VARIÁVEIS DO CÓDIGO DO PACOTE "SAM"






















- I32** # **Buffer** Tamanho do "buffer", isto é, o número de pontos de aquisição retirados em memória. Por omissão, este toma o valor de 1,000. Este permite guardar valores a uma elevada frequência de aquisição, enquanto tarefas demoradas (tais como escrever indicadores e, principalmente, desenhar gráficos) são executadas.
- U32** # **Ciclos do buffer** Número de vezes que o "buffer" é esvaziado.
- I32** # **Cristas** Número de cristas no sinal encontradas para o nível e largura dados.
- U32** # **Ef. Ciclos** Número de ciclos gerados no "buffer" e transferidos da placa de aquisição.
- I32** # **Scans** Número de pontos de aquisição retirados do "buffer" de aquisição.
- DBL** v Parâmetro adimensional de Longuet-Higgins, 1984, que mede a largura espectral. Quanto menor o valor de v, mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamentos de ondas existem.
- F32** [f,S(f)] Representação gráfica do espectro, sendo as abcissas frequências (em Hz) e as ordenadas densidades (em m<sup>2</sup>.s).
- SGL** **1D data** Vector unidimensional que contém valores reais.
- SGL** **2D data** Vector bidimensional que contém valores reais.
- DBL** **a(k)** Coeficiente de Fourier correspondente à harmónica k.
- TF** **Adimensionar** Permite adimensionar os eixos do espectro.
- DBL** **alfa(k)** Coeficiente de Fourier correspondente à harmónica k.
- SGL** **all rows** Todas as linhas (vector bidimensional).
- DBL** **amplitude** Amplitudes das cristas correspondentes aos índices do indicador localização.
- TF** **append to file?** Permite juntar os valores do vector a um ficheiro já existente.
- F32** **Aquisição** Gráfico com a aquisição nas sondas pretendidas. O eixo das ordenadas pode ser escalado em V ou cm. Trata-se somente de uma transformação na visualização, uma vez que os valores adquiridos para ficheiro estão em metro (m).
- TF** **Aquisição para ficheiro (SDN)** Selector que possibilita guardar os valores adquiridos nas diversas sondas (até 8 no total) num ficheiro, geralmente de extensão SDN.
- U32** **Atraso** Referência ao atraso da leitura dos dados em relação à aquisição, ou seja, a quantidade de valores adquiridos menos a quantidade de valores lidos (desenhados). Se o valor aumentar à medida que se lê os dados, isso significa que essa leitura não está a ser suficientemente rápida para a frequência de aquisição pretendida. Nesse caso, há que reduzir a frequência de aquisição ou aumentar o tamanho do "buffer" de aquisição (nº de pontos").

- DBL** **b(k)** Coeficiente de Fourier correspondente à harmónica k.
- DBL** **c(k)** Coeficiente de Fourier correspondente à harmónica k.
- abc** **Canais AQUIS** “String” de identificação do canal ou canais de entrada, de aquisição (para a placa actual, 8 no máximo). Por exemplo, para indicar os canais (sondas) 1, 2, 3, 4 e 5, escrever 1:5. Para indicar somente os canais 2 e 4, escrever 2, 4.  
OBS: Em testes (ciclo fechado), costuma ser 7. Para o macaco hidráulico, 2.
- abc** **Canais GER** “String” com a identificação do canal ou canais de saída (para a placa actual, 2 no máximo). Pode, por exemplo, tomar a designação { 0,1 } para identificar os canais 0 e 1.
- TF** **Comando ELE** Selector que possibilita guardar os valores do ficheiro de comando do batedor, geralmente de extensão ELE.
- DBL** **d** Profundidade da água no canal, em metros.  
OBS: Este parâmetro só é importante quando se pretende, para além da simulação numérica, a geração física.
- abc** **data** Informação da data actual.
- abc** **delimiter** (Tab) Tipo de delimitador (por omissão, é um “tab”).
- DBL** **df, df\*, dfa** Intervalo entre frequências das ordenadas do espectro.
- DBL** **DifMin** Diferença mínima nas inequações de compatibilidade entre sondas. Por omissão, DifMin = 0.01.
- DBL** **DMQ** Desvio Médio Quadrático, correspondente ao deslize no tempo do registo SND.
- DBL** **DMQM** Desvio Médio Quadrático Mínimo, correspondente ao deslize tM no tempo do registo SND.
- DBL** **dt, dt\*, dta** Intervalo de digitalização, ou intervalo de tempo entre observações, inverso de fd, em s.
- I32** **Duração** Valor da duração da aquisição = duração do sinal gerado.
- DBL** **dx** Distâncias (em m) entre as diversas sondas: x12 - entre a sonda 1 e a sonda 2; x13 - entre a sonda 1 e a sonda 3; x14 - entre a sonda 1 e a sonda 4; [ ... ] etc.
- DBL** **Envolvente REIA** Função envolvente calculada através da Raiz quadrada da Energia Instantânea Alisada (SIWEH).
- DBL** **Envolvente RH** Função envolvente calculada da maneira clássica através da Transformada de Hilbert.
- DBL** **Erro** Valor do erro médio, na actual iteração, entre a envolvente actual e a envolvente inicial dada.
- DBL** **Erro Máx.** Valor do erro máximo admissível nos mínimos quadrados entre a envolvente da presente iteração e a envolvente inicial dada.
- DBL** **Erro Médio Quadrático (X,Y)** Valor do Desvio Médio Quadrático.
- abc** **error in** Descrição do erro de entrada (em princípio, sem erro).

- [FFT]** **error out** Descrição do erro de saída (se houver algum).
- [I32]** **Escala** Definição da escala geométrica do modelo. Utilização da lei de semelhança de Froude. Por omissão, usa-se 1/1.
- [I32]** **Escolha o tipo de Simulação e Geração:** Escolha do método segundo o qual se vai produzir agitação na água. Os métodos existentes são:  
 1- Espectro - Método da Fase Aleatória  
 2- Espectro + Grupos de Ondas - Método da Escalagem  
 3- Perfil Dado - Método da integração da velocidade horizontal  
 4- A partir de um ficheiro de comando do batedor (ELE).
- [I32]** **Tipo de Simulação Numérica:** Escolha do método de simulação numérica para, eventualmente, produzir agitação na água. Os métodos existentes são:  
 1- Espectro - Método da Fase Aleatória  
 2- Espectro + Grupos de Ondas - Método da Escalagem  
 3- Perfil Dado - Método da integração da velocidade horizontal.
- [TF]** **ESP/COM** Selector que permite optar por um dado tipo de ficheiro de resultados: ESP - Freqüências e ordenadas do espectro, COM- Freqüências apenas.
- [DBL]** **Espectro alisado Xa** Espectro (alisado) do sinal temporal inicial.
- [FFT]** **Espectro** Representação gráfica do espectro obtido após utilização da Transformada Rápida de Fourier (FFT) do sinal. Se se quiser, as ordenadas deste espectro podem ser guardadas num ficheiro .ESO.
- OBS: Este gráfico permite a deslocação de um cursor (a amarelo), com indicação das suas coordenadas [f, S(f)] no topo do gráfico.
- [DBL]** **Espectro, S(f)** Ordenadas do espectro.
- [FFT]** **Espectros do perfil e da posição do batedor** Representação gráfica dos espectros do perfil, y(t), e da posição do batedor, x(t).
- [TF]** **Espectros em ficheiro?** Selector que possibilita guardar ou não as ordenadas do espectro empírico e do espectro obtido após TF num ficheiro, geralmente de extensão ESP.
- [FFT]** **Espectros Gerado e Adquirido** Representação gráfica dos espectros gerado e adquiridos nas diversas sondas. O tipo de alisamento destes espectros é controlado pelos controles NJGer, NJAquis, e Janela Temporal, em baixo.
- [FFT]** **Espectros incidente e reflectido** Representação gráfica dos espectros incidente e reflectido, obtido através da utilização do método de Mansard e Funke, 1980, com ligeiras adaptações, utilizando também FFT's. As ordenadas destes espectros são guardadas em dois ficheiros, geralmente de extensões .ESI e .ESR, respectivamente.
- [FFT]** **Espectros Inicial e Obtido** Representação gráfica do espectro inicial [S(f)] pretendido, determinado do ficheiro dado, e do espectro obtido [S\*(f)] por FFT e após escalagem.
- [FFT]** **Espectros** Representação gráfica dos espectros pretendido (simulado), com as características introduzidas pelo utilizador, e do espectro obtido após utilização da Transformada Rápida de Fourier (FFT) do sinal simulado. As ordenadas deste espectro poderão ser guardadas, juntamente com as ordenadas do espectro pretendido (espectro empírico), em ficheiros ESP e ESO, respectivamente.
- [DBL]** **f (Hz)** Freqüência de amostragem de um sinal, em Hz.

- [SGL]** **f AQUIS** Frequência de aquisição das elevações em todas as sondas, isto é, o nº. de pontos adquiridos por segundo.
- [DBL]** **f final (Hz)** Frequência de actualização do ficheiro de comando do batedor, isto é, o no. de ordens dadas ao batedor por segundo.
- [DBL]** **f Ger** Frequência de actualização do ficheiro de comando do batedor, isto é, o no. de ordens dadas ao batedor por segundo.
- [DBL]** **f Per** Frequência do sinal do perfil dado. Caso o sinal a gerar (f Ger) tenha uma frequência diferente, será necessário fazer interpolação/extrapolação.
- [DBL]** **fc** Frequência de corte, ou máxima, do espectro do sinal simulado. Frequência máxima considerada no algoritmo de separação dos espectros incidente e reflectido. Em sinais da natureza, é costume considerar-se  $fc=0.5$  Hz, ao passo que à escala do canal (1/50) é costume usar-se  $fc=2$  Hz. Por outro lado,  $fc \leq f_{max}$ .
- [DBL]** **fd** Frequência de digitalização, inverso do intervalo entre observações ( $= 1/dt$ ), em Hertz ou ciclos/segundo. Deve satisfazer-se a seguinte condição:  $fd > 2 * f_{max}$ , sendo  $f_{max}$  a frequência máxima presente no sinal. Nos canais do LNEC é costume usar-se  $fd=80$  Hz, embora considerado excessivo.
- [TF]** **Ficheiro/Directo** Selecção da origem do registo.
- [TF]** **Ficheiro de Comando (ELE)** Selector que possibilita guardar os valores do ficheiro de comando do batedor, geralmente de extensão ELE.
- [Dmg]** **file path** Caminho do ficheiro de leitura ou de escrita.
- [SGL]** **first row** Primeira linha (vector unidimensional).
- [DBL]** **fm, fm\*, fma** Frequência mediana calculada através do espectro, em Hz.
- [DBL]** **fmax, fmax\*, fmaxa** Frequência máxima do espectro, em Hertz. Frequência máxima que o sinal inicial poderá exibir, frequência de Nyquist.
- [abc]** **format** Formato dos valores de leitura ou de escrita.
- [DBL]** **fp, fp\*, fpa** Frequência de pico do espectro, isto é, a frequência que corresponde à máxima ordenada do espectro, em Hz.
- [SGL]** **fr** Frequência real de aquisição, em Hz.
- [ST]** Funções envolventes inicial e escalada e sinal simulado escalado Representação gráfica temporal das seguintes funções:  
 1 - Envolvente REIA ou RHA, ou Registo REG, dado,  $V(t)$ ;  
 2 - Altura de onda limite (constante) do agrupamento de ondas,  $H_c$  - "threshold wave height = 2 x threshold level";  
 3 - Para cada iteração, sinal simulado da elevação da água,  $x^*(t)$ , calculado por método semelhante ao SIWEH de F&M, 1979;  
 4 - Para cada iteração, envolvente do sinal calculado em 3,  $V^*(t)$ , calculado pelo mesmo método.
- [DBL]** **g** Valor do parâmetro  $\gamma$  (gamma) no espectro JONSWAP-Goda. Aceleração da gravidade.
- [DBL]** **Ganho** Botão de ganho do gerador, que evita o recurso ao botão de ganho geralmente existente à entrada da servo-válvula do batedor. Assim, 0% de ganho corresponde à imobilização do batedor, ao passo que 100% de ganho corresponde a movimentos do batedor proporcionais às elevações do sinal a gerar, sendo que o curso máximo do batedor é atingido na elevação máxima do sinal.



-  **Geração** Gráfico do sinal a gerar na água, afectado pelo ganho do gerador.
-  **Gerar** Botão que inicia a geração do sinal na água.
-  **GKE, GKE\*** Número médio de ondas entre dois começos sucessivos de grupos de ondas utilizando a teoria Kimura Espectral, Kimura, 1980, Battjes e Vledder, 1984.
-  **Gráfico Cristas** Representação gráfica de cristas num registo.
-  **Gráfico do Espectro** Representação gráfica do espectro empírico, com as características introduzidas pelo utilizador. O espectro empírico é guardado num ficheiro .ESP (frequências e ordenadas) ou .COM (só ordenadas).
-  **Guardar espectro, Guardar espectros em ficheiro** Selector que possibilita guardar as ordenadas do espectro empírico e do espectro obtido após TF, num ficheiro, geralmente com extensões, respectivamente, ESP e ESO.
-  **Guardar o ficheiro?** Selector que possibilita guardar os valores de ficheiro.
-  **Guardar o registo em ficheiro (RGT)** Selector que possibilita guardar ou não os valores do registo simulado (uma coluna com as elevações ou duas colunas - tempo e elevação), num ficheiro geralmente de extensão RGT.
-  **Hc, Hc\*** Altura de onda de grupo de ondas, que corresponde a um nível  $v$  a partir do qual se considera haver grupos de ondas, em metros.
-  **Hora** Informação da hora actual.
-  **HS, HS\*, Hsa** Altura significativa calculada do espectro através da fórmula  $4 \cdot \sqrt{m_0}$ , em metros.
-  **HS/?=Hc** Nível de grupo de ondas, expresso em partes de altura significativa, isto é, o denominador do nível de agrupamento de ondas utilizado, sendo que o numerador é HS.
-  **HSI** Altura significativa incidente calculada através da energia do espectro incidente ( $m_{0I}$ ), após alisamento com janela de Bartlett.
-  **HSm** Altura significativa à escala do modelo, em metros.
-  **HSp** Altura significativa real (protótipo), em metros.
-  **HSR** Altura significativa reflectida calculada através da energia do espectro reflectido ( $m_{0R}$ ), após alisamento com janela de Bartlett.
-  **ID 1** Nome do ficheiro que contém o registo simulado ou do canal para um primeiro canal de geração - deixar o outro em branco se só pretender gerar num canal.
-  **ID 2** Nome do ficheiro que contém o registo simulado ou do canal para o 2º canal de geração.
-  **ID ENV** Nome do ficheiro que contém a envolvente dada,  $V(t)$ .
-  **ID ESC** Nome do ficheiro que contém a envolvente escalada,  $V^*(t)$ , do novo sinal iterado.
-  **ID ESP** Nome do ficheiro que contém as frequências e ordenadas do espectro dados. Notar que este ficheiro deve conter 2 colunas,  $f$  e  $S(f)$ , "tab delimited".

- ID, ID REG, ID RGT, ID SDN** Nome do ficheiro que contém o registo pretendido. No caso de este campo se encontrar vazio (o que acontece sempre que se inicia o programa), será perguntado o nome do ficheiro. Se a seguir se correr o programa em modo contínuo, não será necessário introduzir mais vezes este campo, a não ser evidentemente que se pretenda mudar de ficheiro. O ficheiro deve conter, por coluna, as observações correspondentes às sondas S1, S2, S3, etc., separadas por dt=1/fd. Extensões RGT, SIM, SDN.
- I32** **Index** Índice correspondente ao deslize no tempo do registo SND.
- I32** **Indicador** Informação da parte concluída de um dado módulo.
- DBL** **IO(x)** Resultado da função de Bessel.
- I32** **It.** Nº da iteração actual.
- U16** **Janela Temporal** Tipo de janela temporal utilizada para evitar o fenómeno de Gibbs. Por omissão, não se considera janela nenhuma, ou melhor, considera-se a janela rectangular!
- I32** **Jdir** Número de cristas acima do nível v.
- DBL** **JKE, JKE\*** Número médio de ondas nos grupos de ondas utilizando o método de Kimura Espectral, Kimura, 1980, Battjes e Vledder, 1984.
- DBL** **JLH, JLH\*, E[J] LH** Valor de  $E[J]$ , obtido pela fórmula de Longuet-Higgins, 1984. Varia com o nível v (ou  $H_c$ ) considerado.
- DBL** **kFG** Selector de aumento ou diminuição do parâmetro de grupo de onda considerado. Sendo o parâmetro inicial = a e o parâmetro pretendido com a simulação = b, o valor da Redução/Ampliação será o cociente b/a.
- DBL** **KH, KH\*** Parâmetro de correlação espectral, parâmetro adimensional devido a Battjes, 1974, e Battjes e Vledder, 1984, que mede a largura do espectro. Este parâmetro é importante no cálculo de p22 da teoria de Kimura Espectral, 1980, e está relacionado com o coeficiente de correlação entre ondas sucessivas, rH.
- DBL** **Ks AI, KSi** Constante do registo que pode ser, se este vier do canal, a característica da sonda, obtida no processo de calibração da sonda. Aqui, esta constante (que, na verdade, varia de dia para dia!) deverá ser expressa em m/V.  
OBS: Neste painel estão previstas apenas 6 sondas de aquisição (S1, S2 e S3). Se houver mais, até ao máximo de 8, alargar os campos com o rato, se necessário.
- DBL** **L** Comprimento de onda, de período T, à profundidade d.
- DBL** **L(k)** Comprimento de onda para a harmónica k.
- DBL** **L0** Comprimento de onda ao largo (águas profundas)
- I32** **largura** Número mínimo de pontos consecutivos para definição de uma crista.
- DBL** **localização** Índice de localização das cristas.
- I32** **M** Nº de sondas.
- DBL** **m0** Momento de ordem zero de um dado espectro, cujo valor é igual à área desse espectro.

- DBL** **max** Máximo de elevação do sinal dado.
- DBL** **Max tS** Limite máximo do deslize no tempo para efeitos de comparação entre o registo pretendido (RGT) e o obtido numa dada sonda (0, 1, 2, ...) correspondente ao ficheiro \*.SND acima.  
Para uma comparação simples (sem deslize no tempo), Max t S = 0.
- OBS: O valor de Max tS depende da posição da sonda no canal. Este valor será tanto maior quanto mais distante do batedor estiver a sonda em questão. Uma primeira aproximação deste valor, para cada sonda, é determinada através do cálculo, da teoria linear, do tempo que leva uma onda com um período TZ leva a percorrer a referida distância entre o batedor e a sonda.
- U16** **Método Perfil** Selecção do método de simulação de um dado perfil na água. Presentemente, apenas o método de Integração da Velocidade Horizontal está disponível. No entanto, está previsto incluir, mais tarde, mais dois outros métodos: o Método dos Filtros e o Método da Decomposição de Fourier.
- U16** **Método Selector** que possibilita:  
1 - REIA: Simulação de um sinal dados o Espectro Sini(f) e a Envolvente REIA,  
2 - RHA: Simulação de um sinal dados o Espectro Sini(f) e a Envolvente RHA (através da Transformada de Hilbert).  
3 - REG: Simulação de um sinal dados o Espectro Sini(f) e um registo qualquer REG.
- DBL** **min** Mínimo de elevação do sinal dado.
- I32** **N "buffer"** Número de pontos do ficheiro de comando, que determina, assim, o tamanho do "buffer". O "buffer" pode ser enchido várias vezes, consoante o número de ciclos pretendido, permitindo assim a geração repetida do que está no "buffer".
- I32** **N Útil** Número de pontos úteis da comparação após deslize no tempo.
- I32** **N, N\*** Nº Pontos Simulados / Gerados Nº de pontos de um dado sinal.
- DBL** **new file path** Novo nome do ficheiro (se necessário).
- I32** **Nh** Nº de sinusóides de definição do espectro. Nº de harmónicas utilizadas na análise harmónica dos sinais das sondas.
- DBL** **Nível** Nível a partir do qual se considera existir uma crista.
- I32** **NJ, NJ AQUIS, NJ GER** Nº de pontos da semi-janela de Bartlett (triangular) considerada no alisamento de um dado espectro. O espectro alisado é calculado através de uma média móvel de  $2*NJ+1$  pontos, ponderada triangularmente, e centrada no ponto de cálculo.
- I32** **Nº Pontos Adquiridos** Número de pontos adquiridos nas diversas sondas.
- I32** **Nº pontos do "buffer"** Nº de pontos armazenados no "buffer". Este permite guardar valores a uma elevada frequência de aquisição, enquanto tarefas demoradas (tais como escrever indicadores e, principalmente, desenhar gráficos) são executadas.
- TF** **OK** Botão indicativo de fim de cálculo em cada ciclo. Se estiver verde, significa que os cálculos já terminaram. Se estiver encarnado, ainda há cálculos a decorrer.
- DBL** **p22** Probabilidade.

- [Ft]** **Perfil** Representação gráfica temporal do perfil pretendido no canal ou tanque,  $y(t)$ , e correspondente sinal no batedor modificado de acordo com o método e a distância considerados,  $x(t)$ .
- [DBL]** **Si(k)** Ordenada correspondente à harmónica  $k$  do espectro incidente reconstituído.
- [I16]** **Placa #** Identificação numérica da placa de aquisição. Se só existir uma placa, esta toma o valor 1.
- [DBL]** **Posição Batedor,  $x(t)$**  Sinal no batedor modificado de acordo com o método e a distância considerados.
- [DBL]** **Sr(k)** Ordenada correspondente à harmónica  $k$  do espectro reflectido reconstituído.
- [abc]** **Prompt** Mensagem mostrada ao utilizador. Texto da janela de diálogo.
- [DBL]** **Qe, Qe\*** Parâmetro espectral de Medina e Hudspeth, 1987, baseado em  $Q_p$ , de Goda, 1970, o qual dá uma medida da largura espectral. Quanto maior o valor de  $Q_e$ , mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamento de ondas existe.
- [DBL]** **Qp, Qp\*** Parâmetro espectral de Goda, 1970, que dá uma medida da largura espectral. Quanto maior o valor de  $Q_p$ , mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamentos de ondas existem.
- [DBL]** **r0** Coeficiente de reflexão global obtido através das energias dos espectros incidente e reflectido ( $m_{0I}$  e  $m_{0R}$ ), após alisamento com janela de Bartlett.
- [TF]** **Registo em ficheiro?** Selector que possibilita guardar ou não os valores do registo simulado (duas colunas - tempo e elevação) num ficheiro, geralmente de extensão REG.
- [TF]** **Registo interpolado para ficheiro?** Selector que possibilita guardar ou não as ordenadas do espectro empírico e do espectro obtido após TF num ficheiro, geralmente de extensão ESP.
- [Ft]** **Registo numérico (afectado pelo ganho)** Representação gráfica do sinal no tempo simulado numericamente com base num espectro empírico de características indicadas na parte inferior do painel.
- [Ft]** **Registo numérico (simulado ou do canal)** Representação gráfica dos sinais colhidos nas diversas sondas.
- [Ft]** **Registo** Representação gráfica da elevação da superfície da água.
- [DBL]** **rH, rH\*** Aproximação do coeficiente de correlação entre ondas sucessivas, devida a Battjes, 1974, unicamente através do uso de informação espectral.
- [DBL]** **rp** Coeficiente de reflexão global calculado a partir dos picos dos espectros incidente e reflectido [ $S_i(f_p)$  e  $S_r(f_p)$ ], após alisamento com janela de Bartlett.
- [DBL]** **S** Ordenada do espectro correspondente à frequência  $f$ .
- [DBL]** **S(f)** Espectro em frequência.
- [SGL]** **S1, S2, S3 .., S8** Valor digital da 1ª Sonda, 2ª Sonda, 3ª Sonda, .. 8ª Sonda, em cV.
- [I32]** **Seleção** Selector principal do módulo de interface. Permite escolher um dos diversos módulos constituintes do pacote de *software* SAM.

- abc** **Senha** Código de segurança (*password*).
- TF** **Simulação Numérica sem geração** Selector de Simulação Numérica apenas, sem geração. Com esta opção, o sinal não é afectado por qualquer função de transferência devida ao batedor.
- FFT** **Sinal Adquirido** Sinal Adquirido na água pelas diversas sondas colocadas no canal ou tanque. Actualmente, a placa de aquisição de dados permite adquirir 8 canais simultaneamente, correspondentes a igual número de sondas. As sondas tomam a designação de S1, S2, S3 ....
- DBL** **Sinal alisado Xa** Sinal obtido após alisamento com NJ pontos.
- DBL** **Sinal bruto X** Sinal bruto no tempo ou na frequência.
- DBL** **Sinal Comando**, Sinal eléctrico [-2048..2047] cV 2 Sinal de comando limitado, em unidades cV.
- EXT** **Sinal interpolado preparado** Sinal interpolado, "aparado" nas extremidades para evitar mudanças bruscas no comando do batedor.
- EXT** **Sinal interpolado** Sinal obtido após interpolação de valores.
- EXT** **Smax, Smax\*, Smaxa** Máxima ordenada de um dado espectro, em  $m^2/Hz$ .
- I32** **Sonda (0, 1, ...M-1)** Número da sonda (0, 1, 2, ...) correspondente ao ficheiro \*.SND.
- TF** **Stop** Botão de paragem da execução do módulo. Para regressar ao módulo anterior, premir o botão acima de "Return to Caller".
- SGL** **t (s)** Instante do tempo. Indicador do tempo decorrido.
- SGL** **t aquisição** Período de tempo de aquisição.
- TF** **t e X(t) ou X(t)** Selector do tipo de ficheiro que contém o registo das elevações: com duas colunas [ t e X(t) ] ou uma única coluna com X(t).
- DBL** **T** Período da onda.
- DBL** **t trans** Instante correspondente ao deslize no tempo do registo SND.
- abc** **Texto** Mensagem que aparece ao utilizador.
- DBL** **TH de Z(t)** Transformada de Hilbert do sinal inicial.
- U16** **Tipo de Simulação** Escolha do método segundo o qual se vai produzir agitação na água. Os métodos existentes são:  
 1- Espectro - Método da Fase Aleatória  
 2- Espectro + Grupos de Ondas - Método da Escalagem  
 3- Perfil Dado - Método da integração da velocidade horizontal.
- U16** **Tipo Espectro** Tipo de espectro empírico a utilizar para a simulação numérica do sinal:  
 1- JONSWAP-Goda ( $\gamma$ , HS, Tp);  
 2- Pierson-Moskowitz GENERALizado (HS);  
 3- Pierson-Moskowitz ITTC (HS, Tp);  
 4- Somente ruído branco.
- DBL** **tM (s)** Deslize no tempo do registo SND que minimiza o desvio médio quadrático.

- [DBL]** **Tp, Tp\*, Tpa** Período de pico de um dado espectro, em segundos. Período de pico do espectro, calculado de acordo com Goda, 1985:  $TS=T1/3=1/(1.05*fp)$ .
- [DBL]** **Tpm** Período médio de zero ascendente à escala do modelo, em segundos.
- [DBL]** **Tpp** Período de pico do espectro real (protótipo), em segundos.
- [DBL]** **TR, TR\*** Duração total de um dado sinal temporal, em segundos.
- [TF]** **transpose (no:F)** Selector que permite a inversão das matrizes após leitura de ficheiro ou antes da escrita em folha de cálculo.
- [DBL]** **TZ, TZ\*, TZa** Período médio de zero ascendente, em segundos.
- [DBL]** **TZm** Período médio de zero ascendente calculado através do espectro obtido à escala do modelo, em segundos.
- [DBL]** **TZp** Período médio de zero ascendente calculado através do espectro obtido à escala do protótipo, em segundos.
- [abc]** **Utilizador** Nome do utilizador do pacote Simulação da Agitação Marítima.
- [DBL]** **v** Nível a partir do qual se considera haver grupos de ondas, em metros =  $Hc/2$ .
- [TF]** **V ou cm** Botão que permite visualizar as unidades da aquisição em metro ou em Volt. Notar que esta mudança de unidade ocorre apenas no gráfico, pelo que há sempre que verificar se a constante  $Ks$  AI está correcta, uma vez que esta se reflectirá sempre no ficheiro de aquisição.
- [DBL]** **x** Argumento da função de Bessel.
- [DBL]** **X(i,j)** Conjunto de registos, nas M sondas, obtidos em instantes não simultâneos.
- [DBL]** **X(i,j) Inter** Conjunto de registos, nas M sondas, obtidos simultaneamente.
- [EXT]** **X(t)** Registo das elevações da superfície.
- [DBL]** **x0, x1** Distância do batedor de ondas ao ponto onde se pretende obter o dado perfil da superfície da água, em metros. No caso de  $x0=0$ , impossível na prática, o cálculo é mais rápido. Se  $x0>0$ , tem que se calcular adequadas modificações nas fases de cada harmónica.
- [DBL]** **x12, x13,...** Distâncias (em m) entre as diversas sondas:  
 x12 - entre a sonda 1 e a sonda 2;  
 x13 - entre a sonda 1 e a sonda 3;  
 x14 - entre a sonda 1 e a sonda 4;[ ... ] etc.
- [DBL]** **y(t)** Perfil pretendido no canal ou tanque.
- [DBL]** **y1(t)** Perfil no batedor de acordo com o método e distância àquele.
- [DBL]** **Z(t)** Sinal bruto no tempo ou na frequência.

# ACRÓNIMOS

|                |   |   |
|----------------|---|---|
| <b>CCC</b>     | - | Critério de crista a crista ( <i>Crest to Crest Criterion</i> )                     |
| <b>DIR</b>     | - | Método <b>DIR</b> ecto  |
| <b>EIA</b>     | - | <b>E</b> nergia <b>I</b> ntantânea <b>A</b> lisada                                  |
| <b>ENV</b>     | - | Método da <b>ENV</b> olvente  |
| <b>FFT</b>     | - | <i>Fast Fourier Transform</i>   |
| <b>GF</b>      | - | <i>Groupiness Factor</i>  |
| <b>JONSWAP</b> | - | <i>JOint North Sea WAVE Project</i>   |
| <b>KE</b>      | - | <b>K</b> imura <b>E</b> spectral  |
| <b>LH</b>      | - | Fórmula de <b>L</b> onguet- <b>H</b> iggins   |
| <b>ME</b>      | - | <b>M</b> étodo da <b>E</b> scalagem   |
| <b>MFA</b>     | - | <b>M</b> odelo das <b>F</b> ases <b>A</b> leatórias                                 |
| <b>OC</b>      | - | Critério de onda orbital ( <i>Orbital Criterion</i> )                               |
| <b>PE</b>      | - | <b>P</b> rocesso <b>E</b> stocástico  |
| <b>REIA</b>    | - | Envolvente da <b>R</b> aiz da <b>E</b> nergia <b>I</b> ntantânea <b>A</b> lisada    |
| <b>RH</b>      | - | Envolvente de <b>R</b> ice/ <b>H</b> ilbert - directo                               |
| <b>RHa</b>     | - | Envolvente de <b>R</b> ice/ <b>H</b> ilbert <b>a</b> lisada                         |
| <b>SAM</b>     | - | Pacote de <i>software</i> de <b>S</b> imulação da <b>A</b> gitação <b>M</b> arítima |
| <b>SIWEH</b>   | - | <i>Smoothed Instantaneous Wave Energy History</i> = EIA                             |
| <b>TF</b>      | - | <b>T</b> ransformada de <b>F</b> ourier   |
| <b>TH</b>      | - | <b>T</b> ransformada de <b>H</b> ilbert   |
| <b>ZDC</b>     | - | Critério de zero descendente ( <i>Zero Down-crossing Criterion</i> )                |
| <b>ZUC</b>     | - | Critério de zero ascendente ( <i>Zero Up-crossing Criterion</i> )                   |





# PARTE I



# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

---

## 1.1 ENQUADRAMENTO

A presente dissertação, apresentada no Instituto Superior Técnico (IST) – Universidade Técnica de Lisboa (UTL), intitula-se *Modelação Estocástica Numérica e Física da Agitação Marítima* e descreve o trabalho de doutoramento realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Esta dissertação de doutoramento trata, como o seu nome indica, da modelação estocástica (isto é, do ponto de vista probabilístico), numérica (através de simulação numérica) e física (através de modelação física em canal ou tanque de ondas), da agitação marítima. Estas duas perspectivas, numérica e física, da modelação da agitação marítima têm grande importância em laboratórios ligados à investigação em hidráulica marítima, uma vez que têm sido, e continuam a ser, muitos os trabalhos referentes a estudos de agitação marítima que requerem, por um lado, a utilização de ferramentas numéricas de simulação da agitação marítima e, por outro, a experimentação, em modelo físico, de determinadas características das ondas reais. Essencialmente, entende-se aqui por modelação estocástica da agitação marítima a caracterização e a simulação, numérica e física, sob o ponto de vista probabilístico, de registos de ondas da superfície do mar.

Em termos gerais, espera-se com este trabalho contribuir para um melhor conhecimento dos métodos de caracterização e simulação numérica e física de ondas em ambiente laboratorial. Por outro lado, pretende-se que o pacote de *software*, de nome “**SAM**” (**S**imulação da **A**gitação **M**arítima), que resulta deste trabalho, vá ao encontro das expectativas de índole prática dos laboratórios de hidráulica marítima nacionais, nomeadamente o do IST e o do LNEC.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO

Este trabalho contém cinco partes: a *Parte I*, com este capítulo de introdução; a *Parte II - Aspectos Teórico-práticos da Caracterização e Simulação da Agitação Marítima*, onde se descrevem teorias, métodos de caracterização, simulação, geração (numérica e física) e aquisição de agitação marítima; a *Parte III - Pacote de Software da Caracterização e Simulação da Agitação Marítima*, onde se descreve um pacote de *software* destinado à caracterização e simulação numérica e física da agitação marítima por utilização de métodos e procedimentos descritos na Parte II; a *Parte IV*, com o capítulo final de conclusões, e, finalmente, a *Parte V*, com bibliografia e anexos.

As Partes II e III formam o núcleo do trabalho realizado. Porém, apesar de o número de páginas dedicado à Parte II ser substancialmente superior ao dedicado à Parte III, é de notar que o trabalho envolvido em ambas tem, sensivelmente, a mesma importância.

As Partes I, IV e V justificam-se pelo facto de dizerem respeito a, respectivamente, introdução, conclusões gerais e bibliografia/anexos.

Deste modo:

- A **Parte I** contém apenas este capítulo, **Capítulo 1 - Introdução**, onde se apresenta o resumo desta dissertação e alguns conceitos básicos, muito gerais.
- A **Parte II - Aspectos Teórico-práticos da Caracterização e Simulação da Agitação Marítima** contém os seguintes capítulos:
  - **Capítulo 2 - Caracterização Geral da Agitação Marítima:** dá-se uma panorâmica geral dos métodos de caracterização da agitação marítima a curto prazo (ver mais à frente, em 1.3, a definição) mais utilizados nos domínios do tempo e da frequência, e a sua relação. Este tema, por ser muito vasto, será apenas tocado muito sumariamente, pelo que se abordam apenas os aspectos de maior interesse prático com vista à compreensão dos temas dos outros capítulos.
  - **Capítulo 3 - Caracterização de Grupos de Onda:** particulariza-se a caracterização da agitação marítima no que respeita aos *grupos de ondas*, conjuntos de ondas sucessivas cujas alturas são superiores a um determinado nível de grupo preestabelecido. Apresentam-se os métodos existentes para aquele efeito, apresenta-se um novo método adaptado de um já existente, apresentam-se sugestões de melhoria de alguns dos métodos, assim como as suas vantagens e desvantagens. Finalmente, tenta-se estabelecer relações entre os diversos métodos.
  - **Capítulo 4 - Simulação Numérica de Agitação Marítima:** trata-se da simulação numérica de registos de onda, em computador, considerando somente a especificação de um espectro ou, para além disso, de um determinado factor de agrupamento de ondas. Desenvolve-se uma nova metodologia, denominada *escalagem*, de simulação de registos com uma dada envolvente e determinadas características de grupos de ondas pré-definidas através do *valor médio do número de ondas dos grupos de ondas*,  $E[J]$ , com base na mudança de escala do eixo temporal da função envolvente dada. Apresenta-se também a *simulação numérica condicionada* de registos de ondas, que permite a simulação de registos com um dado espectro e com dada(s) série(s) determinística(s). Para estes dois métodos, desenvolveram-se adequados programas computacionais.
  - **Capítulo 5 - Simulação e Modelação Física de Agitação Marítima:** aborda-se a simulação física, em canal de ondas irregulares (ou em tanque, sem perda de generalidade). Assim, mostra-se como se pode obter agitação marítima com determinadas ca-

racterísticas espectrais e/ou de agrupamento de ondas através de métodos desenvolvidos no âmbito deste trabalho. Apresenta-se um método de simulação física de perfis de elevação pré-especificados, baseado na utilização do *método da integração da velocidade horizontal*, de Gravesen *et al.*, 1974. Neste capítulo, descrevem-se também os métodos existentes de separação dos espectros incidente e reflectido em canais de ondas irregulares. Descrevem-se igualmente as instalações experimentais do LNEC usadas neste trabalho, assim como o equipamento que foi necessário utilizar nos ensaios efectuados.

- A **Parte III - Pacote de Software de Caracterização e Simulação da Agitação Marítima** reúne os aspectos relativos ao pacote de *software*, designado abreviadamente por **SAM**, produzido no âmbito deste trabalho. Esta parte contém um único capítulo, o **Capítulo 6 - Software de Simulação Numérica e Física**, onde se faz uma descrição dos diversos módulos (rotinas de programação principais) e sub-módulos (rotinas de programação secundárias) que constituem o referido pacote de *software*. Faz-se também a ligação destes módulos de programação com a teoria abordada na Parte II. Para este pacote de *software*, composto por nove módulos principais, utilizou-se a linguagem de programação gráfica *G*, com o compilador *LabVIEW* da *National Instruments*. Abordam-se também os aspectos relativos ao equipamento utilizado, aos requisitos mínimos do sistema operativo e à instalação do pacote de *software*. Descrevem-se os menus dos diversos módulos, dando especial evidência ao menu de ajuda (*help*). Finalmente, apresenta-se um conjunto de casos práticos de utilização dos módulos do pacote **SAM**, na perspectiva do utilizador.
- A **Parte IV** contém unicamente o **Capítulo 7 - Conclusões e Recomendações**, que encerra esta dissertação de doutoramento. Neste capítulo, expõem-se de forma resumida as conclusões principais a que se chegou e apresentam-se algumas recomendações e linhas de investigação para desenvolvimentos futuros.
- Finalmente, na **Parte V**, apresentam-se as referências bibliográficas e os anexos deste trabalho.

Pretendeu-se com este documento dar uma visão geral sobre a simulação, geração e aquisição da agitação marítima. Optou-se por não se considerar um único capítulo de revisão bibliográfica, em virtude de se achar que revisões bibliográficas mais curtas e restritas, correspondentes aos assuntos tratados em cada capítulo, terão maior utilidade para o leitor. As referências bibliográficas consultadas para o desenvolvimento do tema em análise em cada capítulo são apresentadas, após o Capítulo 7, da pág. 253 à pág. 262. Notar que, para além das referências mencionadas ao longo do texto desta dissertação, a bibliografia apresentada inclui também outras que, embora não tenham sido referidas no texto, foram consultadas para o desenvolvimento do presente trabalho.

## 1.3 CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Nesta fase da introdução, torna-se útil a apresentação de alguns conceitos de base, definidos a seguir.

### **Modelo Matemático**

Representação matemática de um determinado fenómeno físico, isto é, a equação ou conjunto de equações que, de certa forma, descrevem o fenómeno físico. Qualquer modelo matemático que represente um determinado fenómeno físico pode ser classificado como determinístico ou não-determinístico. É chamado determinístico se o modelo é definido por um relação matemática sem *variáveis aleatórias* (*v.a.*), obtida quer através do uso das leis básicas da mecânica, quer mediante um conjunto de observações repetidas. É probabilístico se no modelo matemático há a intervenção de *v.a.* ou probabilísticas.

Ao olhar demoradamente a superfície do mar, facilmente se chega à conclusão de que a agitação marítima é um processo complexo e cuja modelação através de modelos determinísticos é muito difícil, senão impossível. Realmente, apesar dos complicados modelos que têm sido desenvolvidos para modelar deterministicamente a superfície do mar, verifica-se que estes apenas servem para condições muito particulares.

Uma forma diferente de olhar este fenómeno traduz-se então pela utilização de modelos não determinísticos, isto é, probabilísticos ou estocásticos.

### **Modelo Numérico**

Modelo matemático com discretização, para a utilização em computador, sendo a modelação numérica o processo de construção do modelo numérico.

Em hidráulica marítima, os métodos numéricos assumem papel fundamental na caracterização da agitação marítima real. Os métodos numéricos normalmente usados são estocásticos e o tratamento diz-se de *curto prazo*, dado que se refere a registos de agitação de duração compatível com a hipótese de estacionariedade (considera-se que os registos de 20 minutos de duração, obtidos de 3 em 3 horas fazem parte de um *processo estocástico estacionário* – ver Capítulo 2), por oposição ao tratamento de *longo prazo*, no qual interessa o regime geral de agitação ao longo dos anos em certo local.

### **Modelo Físico**

Reprodução a escala reduzida de um determinado sistema físico. A modelação física é o processo de construção do modelo físico.

A modelação física tem, à partida, uma vantagem indiscutível em relação à modelação numérica, que é o facto de o fenómeno em estudo poder ser observado directamente, por forma visual. Por outro lado, há uma maior flexibilidade na maneira como se podem incluir novos aspectos de simulação num sistema físico. A principal, e muitas vezes determinante, desvantagem do modelo físico

em relação ao modelo numérico correspondente, é o seu custo elevado. Outra desvantagem é o aparecimento do chamado *efeito de escala*, que pode condicionar seriamente o rigor dos resultados.

### **Modelo Híbrido**

Modelo de componentes numéricas e físicas que pretende conjugar algumas das vantagens dos modelos físicos com outras dos modelos numéricos. Realmente, tanto os modelos numéricos como os modelos físicos são actualmente imprescindíveis na análise de problemas complexos, mas ambos têm as suas vantagens e desvantagens, pelo que, de um ponto de vista prático, ou de engenharia, há que utilizar uns ou outros (ou ambos) conforme o fenómeno que se pretende estudar.

### **Modelação**

Processo de construção de um modelo (matemático ou físico). A exploração do modelo para caracterização e/ou simulação é também designada por modelação.

### **Simulação**

Utilização de um modelo para visualização da reprodução (artificial) do fenómeno físico, obtenção de dados, etc.. Em termos simples, simulação da agitação marítima é o processo que permite a reprodução de ondas de superfície reais numericamente, em computador (*simulação numérica*), ou num ambiente de laboratório, em modelo físico (*simulação física*).

No caso da agitação marítima, o objectivo da simulação é, basicamente, a geração ou síntese de sinais analógicos ou digitais correspondentes a um determinado processo a partir da informação, contida quer no seu espectro de variância, quer neste e noutra característica representativa do fenómeno a reproduzir.

Com a simulação numérica da agitação marítima, pretende-se obter, sob a forma digital, registos de onda com dadas características representativas dos estados de mar, reais ou imaginados. Assim, a simulação numérica é geralmente concretizada sob a forma de um registo temporal das elevações da superfície da água,  $\eta(t)$ , num dado ponto, a que se chamará, daqui em diante, *senal* ou simplesmente *registo*, definido mais abaixo.

Já a simulação e modelação física é a transposição do registo ou registos numéricos para a água de um canal ou de um tanque utilizados em experimentação física, o que permite obter informação estatística, difícil ou impossível de obter matematicamente. A informação que se obtém da modelação física pode, por sua vez, ser usada para validar modelos numéricos, assim como para isolar o efeito de certas variáveis e parâmetros, uma vez que a simulação física permite trabalhar em condições controladas.

### **Sinal ou registo**

Como se disse acima, usam-se neste trabalho, indistintamente, os termos *senal* e *registo*, para designar uma função contínua do *tempo* (representando a elevação da superfície da água

numa dada vertical) ou de uma *variável espacial* (representando a intersecção da superfície da água com dado plano, num dado instante). Paralelamente, *série temporal* é usada neste trabalho como sendo uma função de valores discretos, tomados a intervalos de tempo equidistantes, das elevações da superfície da água. A transposição destes registos para o canal ou tanque utilizados na experimentação física é a simulação física.

### **Análise a curto prazo**

Estudos de elevações de superfície obtidas a partir de registos de pequena duração, na ordem dos 20-30 minutos. São, neste âmbito, também estudados aspectos direccionais da agitação do mar. É este tipo de análise (sob os aspectos numérico e físico) que é discutida neste trabalho.

### **Análise a longo prazo**

Estudos das colecções de parâmetros obtidos com base nos registos de curto prazo, coligidas ao longo de vários anos.

Se existir, para certo local, um conjunto de medições da agitação marítima (nomeadamente, alturas, períodos e direcções de onda) durante um período suficientemente extenso, isto é, durante vários anos, pode determinar-se o regime de agitação marítima (a longo prazo). É o que se convencionou chamar de *análise da agitação marítima a longo prazo*, a qual não é tratada neste trabalho. Esse regime de agitação marítima é habitualmente conseguido à custa de informação sobre alturas de onda e direcções de onda, obtidas através de modelos de propagação de ondas que transferem as características da onda de dado local onde existe recolha de dados de agitação marítima, para o local de estudo. A descrição de um regime (ou clima) de agitação a longo prazo é geralmente traduzida num *histograma conjunto* de alturas de onda e períodos ou alturas de onda e direcções.



# PARTE II



# CAPÍTULO 2 - CARACTERIZAÇÃO GERAL DA AGITAÇÃO MARÍTIMA

---

## 2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, apresentam-se algumas noções básicas de processos estocásticos, necessárias para a compreensão do que se segue, e descrevem-se de forma muito sumária alguns dos métodos mais utilizados na caracterização de registos de ondas obtidos na natureza e em ensaios físicos ou numéricos - *métodos do domínio do tempo* e *métodos do domínio da frequência*. Não se pretende apresentar a totalidade dos métodos e procedimentos existentes para esse fim, mas apenas o conjunto mínimo necessário para tratar os assuntos que se seguem. Apresentam-se também algumas noções elementares da teoria dos sistemas lineares e da teoria linear de onda.

## 2.2 NOÇÕES DE PROCESSOS ESTOCÁSTICOS

Um *processo estocástico* (PE),  $Z(t)$ , é uma função aleatória, de variável real,  $t$ , tal que para cada  $t = t_0$ ,  $Z(t_0)$  é uma v.a.. O conjunto de valores da v.a. que ocorrem ao longo do tempo é designado por *função-amostra* (*sample function*) ou, mais correntemente, *realização*,  $\eta(t)$ . Assim, um PE pode ser encarado, de forma intuitiva, como o conjunto de todas as realizações possíveis de uma certa v.a. característica.

As realizações a que se tem acesso na prática da Hidráulica Marítima são normalmente registos de elevações da superfície da água, geralmente de 20-30 minutos de duração. São estas realizações que terão de servir para a caracterização de um determinado PE de agitação marítima.

O tema (complexo) dos PE aplicados à hidráulica marítima justifica, por si só, uma tese de doutoramento, pelo que nesta, de âmbito mais amplo, apenas se fará referência a resultados importantes para a compreensão da matéria que se segue. Sobre este tema dos PE poderão ser consultados os trabalhos mais aprofundados de Carvalho, 1973 e 1981, ou Parzen, 1964, por exemplo.

Neste trabalho, admite-se que os registos das elevações das ondas num dado ponto são realizações de um PE que é estacionário, ergódico e normal. Estas hipóteses são plausíveis no tratamento de estados de mar, cujos registos das elevações da superfície do mar são, como se referiu, tipicamente de 20-30 minutos de duração. Assim, explicam-se a seguir, de um modo bastante simples e

intuitivo, os conceitos de estacionariedade, ergodicidade e normalidade envolvidos nos PE tratados neste trabalho.

### **Estacionariedade**

Um PE *estacionário* é aquele cujos parâmetros estatísticos (médias, desvios-padrão, etc., em cada instante no conjunto das realizações) são invariáveis com o tempo. A aproximação de um modelo destas características aos fenómenos da natureza é razoável na maioria dos casos.

### **Ergodicidade**

Para o estado de mar de curto prazo, considerado estacionário, pode, teoricamente, haver infinitas realizações. Num caso real, tem-se geralmente acesso a uma única realização, geralmente um registo da elevação da superfície do mar efectuado, por exemplo, por uma dada bóia, num determinado ponto. Se os parâmetros estatísticos calculados por médias ao longo do tempo puderem ser considerados iguais aos calculados em cada instante no conjunto das realizações, então o PE diz-se *ergódico*.

A ergodicidade é uma hipótese que se põe frequentemente, quando se analisam registos reais (obviamente limitados) de agitação marítima. Para a simulação numérica, esta hipótese pode não se colocar visto que se podem gerar as realizações que se desejarem com facilidade.

Considerando que os registos das elevações da superfície da água são resultantes da observação de um curto período de tempo (20 minutos, por exemplo), é razoável admitir que o estado de mar nesse período se mantém aproximadamente constante, pelo que o PE correspondente se pode, em geral, considerar ergódico.

### **Normalidade**

Um PE,  $Z(t)$ , é *Normal ou gaussiano* quando, para um qualquer conjunto de instantes  $\{t_n\}$ , as v.a.  $Z(t_n)$  seguem a distribuição Normal multidimensional. Este tipo de PE é bastante comum em sistemas físicos, o que é de esperar, se se tiver em conta o teorema limite central da Teoria da Probabilidade.

De facto, é habitual considerar que a elevação da superfície do mar,  $\eta(t)$ , é o resultado da sobreposição de um número infinito de v.a. independentes. O teorema limite central diz então que a distribuição da soma destas v.a. independentes é *Normal*. Deste modo, a densidade de probabilidade,  $p(\eta)$ , é dada por

$$p(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2-1)$$

sendo:

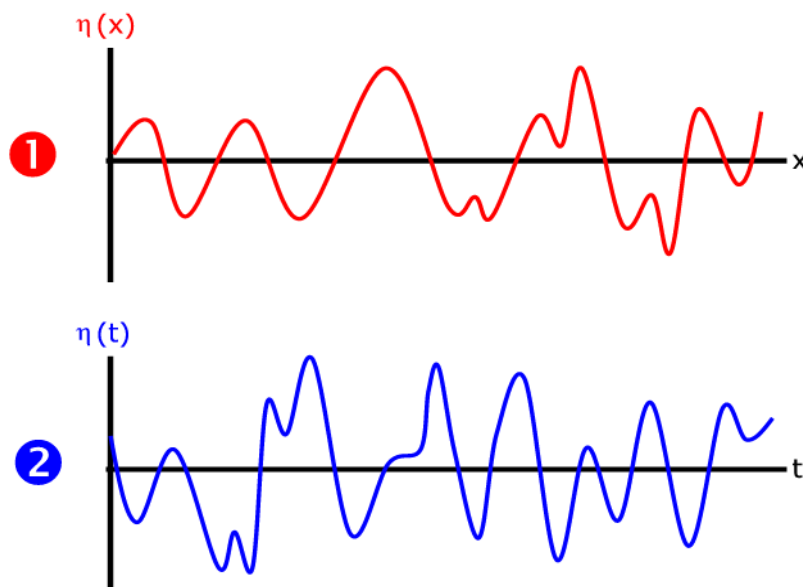
$\sigma$  - o desvio-padrão de  $\eta(t)$ .

Admite-se evidentemente que a média é nula, ou seja, que  $\eta(t)$  é medido relativamente ao nível médio.

## 2.3 DESCRIÇÃO NO TEMPO

Ao observar-se a superfície do mar, verifica-se que esta tem características tridimensionais óbvias. No entanto, é habitual e aceitável tratar a superfície do mar em planos bidimensionais. Verifica-se que se pode analisar a superfície da água segundo dois critérios diferentes, conforme se considere a sua elevação uma função espacial,  $\eta(x)$ , segundo um dado plano vertical, num dado instante, ou uma função contínua do tempo,  $\eta(t)$ , numa dada vertical.

Por exemplo, ao fotografar lateralmente, num dado instante, um canal de ondas, obtém-se uma imagem de um registo utilizando o primeiro critério (Fig. 2-1 - ❶); ao grafar numa dada secção do canal os sucessivos valores do nível da superfície da água, ao longo de um certo período de tempo, obtém-se um registo no tempo utilizando o segundo critério (Fig. 2-1 - ❷).



**Fig. 2-1 - Perfis de elevações: ❶ espacial ( $t$  fixo) e ❷ temporal ( $x$  fixo)**

É este último tipo de registo que se obtém numa bóia-ondógrafo estacionada num dado local no mar, e é este o considerado neste trabalho.

Deste modo, um registo das elevações da superfície da água, numa dada vertical, determinadas a cada  $\Delta t$  segundos, conterá  $N$  valores  $\eta(i.\Delta t)$ , com  $1 \leq i \leq N$ , e terá a duração  $T_R = N.\Delta t$ .

Recorde-se que a modelação estocástica pressupõe que um registo é apenas uma das infinitas realizações possíveis de um processo estocástico.

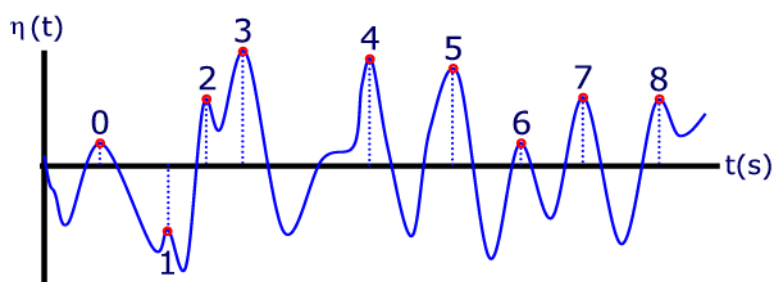
### 2.3.1 CRITÉRIOS DE DEFINIÇÃO DE ONDA

Quando se analisa um registo (de uma bóia-ondógrafo, por exemplo), há em primeiro lugar que estabelecer que critério ou critérios usar para identificação de "uma onda", ou, como por vezes se diz também, de uma *onda individual*<sup>1</sup>, que consiste em cada uma das "oscilações" que se identificam num registo de elevações da superfície da água.

A definição de onda é pouco consensual (Goda, 1985). Dos critérios de definição de onda existentes na literatura, há um que é incontestavelmente mais utilizado: trata-se do *critério de zero ascendente*, razão fundamental (embora não única) pela qual será utilizado ao longo deste trabalho. A seguir, são apresentados este e outros critérios também bastante conhecidos.

#### **Critério de onda de crista a crista**

No *critério de crista a crista* (*crest to crest criterion - CCC*) considera-se que existe uma onda entre cada dois máximos sucessivos da elevação da superfície do mar. No caso do registo representado na Fig. 2-2, identificam-se, deste modo, 8 ondas de crista a crista.



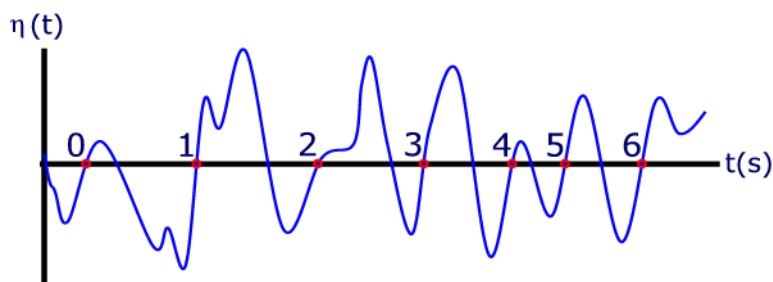
**Fig. 2-2 - Definição de ondas com base no critério de crista a crista (CCC)**

#### **Critério de onda de zero ascendente**

O *critério de zero ascendente* (*zero up-crossing criterion - ZUC*), permite identificar a ocorrência de uma onda quando há duas passagens consecutivas da elevação da superfície pelo nível

<sup>1</sup> Neste trabalho, a onda individual, contínua, é definida através da utilização de um dos vários critérios referidos. Pode, porém, discretizar-se uma onda individual, ficando-se então na posse de um conjunto de valores (discretos) que definem essa onda com maior ou menor resolução, por oposição ao seu registo contínuo. Na verdade, qualquer registo de elevações da superfície do mar (efectuado, por exemplo, com uma bóia-ondógrafo) contém valores discretos dessas elevações. Estes, por sua vez, permitem, com base num dado critério de onda, obter as ondas individuais que formam o registo.

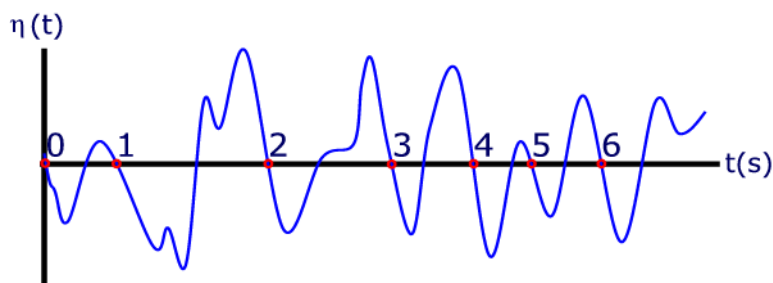
médio, no sentido ascendente. A onda é limitada por estes zeros ascendentes (Fig. 2-3). Para o mesmo registo da Fig. 2-2, identificam-se com este critério 6 ondas.



**Fig. 2-3 - Definição de ondas com base no critério de zero ascendente (ZUC)**

**Critério de onda de zero descendente**

O critério de zero descendente (*zero down-crossing criterion - ZDC*) permite identificar a ocorrência de uma onda quando há duas passagens consecutivas da elevação da superfície pelo nível médio, no sentido descendente. A onda é limitada por estes zeros (Fig. 2-4). Com este critério, que é equivalente ao critério ZUC, identificam-se também 6 ondas.



**Fig. 2-4 - Definição de ondas com base no critério de zero descendente (ZDC)**

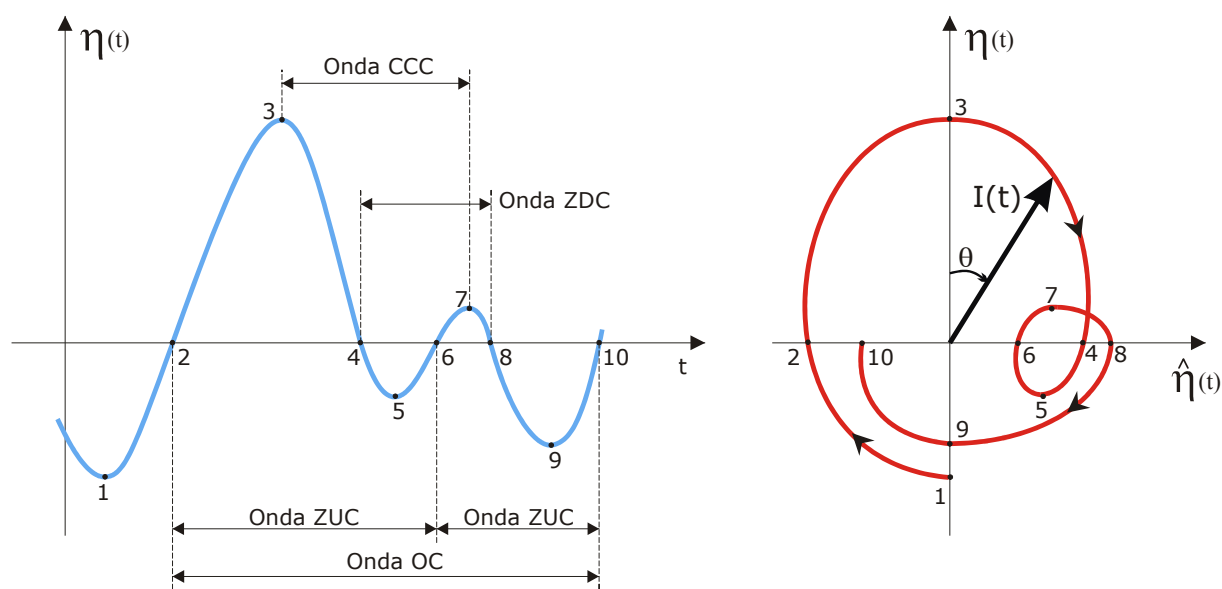
**Critério de onda orbital**

No critério de onda orbital (*orbital criterion - OC*) utiliza-se um plano complexo definido na componente real pela elevação da superfície da água,  $\eta(t)$ , e na componente imaginária pela Transformada de Hilbert (TH) de  $\eta(t)$ , designado  $\hat{\eta}(t)$ . A TH é uma ferramenta matemática tratada no **Anexo 1 - Ferramentas Matemáticas**.

O raio-vector do percurso da onda orbital,  $I(t)$ , é, assim, definido por:

$$I(t) = \eta(t) + i\hat{\eta}(t) = |I(t)|e^{i\theta(t)} \tag{2-2}$$

Segundo este critério, uma onda é definida quando há um avanço no plano complexo de  $2\pi$  da fase  $\theta(t)$  de  $I(t)$ , cujo percurso é mostrado a encarnado na Fig. 2-5, e não apenas quando há um cruzamento da elevação,  $\eta(t)$ , cujo percurso é mostrado a azul, do nível de referência no sentido ascendente ou descendente (no caso dos critérios ZUC e ZDC, respectivamente).



**Fig. 2-5 - Definição de onda orbital (Onda OC) e relação com a onda de zero ascendente (Onda ZUC) e a onda de zero descendente (Onda ZDC) - adaptado de Pires Silva, 1995**

Claramente, com este critério, identificam-se como ondas apenas uma parte das identificadas pelos critérios anteriores (onde as ondas são descritas apenas no plano real). Por exemplo, na mesma figura pode ver-se que o critério ZUC identifica duas ondas entre os pontos 2 e 10, ao passo que o critério OC identifica apenas uma; ou seja, para este último critério, entre os pontos 6 e 8, não se considera que haja elevação da superfície da água para efeitos de definição de onda.

Giménez *et al.*, 1994, e Pires Silva, 1995, descrevem este novo critério de selecção de ondas baseado na definição de onda orbital, em oposição aos critérios ZUC e ZDC. Às ondas existentes por outros critérios que não satisfazem o critério orbital, os autores chamam *ondas falsas*. Por outro lado, estes autores concluem que o uso do critério orbital conduz a uma distribuição de alturas de onda mais concordante com a *distribuição de Rayleigh* (ver definição em 2.3.2, Eqs. (2-3) e (2-4)), a qual é uma aproximação da distribuição real das alturas de onda.

Em Pires Silva, 1995, pode consultar-se um aprofundado estudo sobre os diferentes critérios existentes de definição de ondas.

### **Critério de definição de onda utilizado neste trabalho**

Neste trabalho utilizou-se, para definição de onda individual, o critério de zero ascendente (ZUC - Fig. 2-3) por ser, por um lado, o mais utilizado (como diz Pires Silva, 1995, este critério



“está bem enraizado na prática da análise de registos”) e, por outro, mais simples de empregar que o critério orbital.

Notar que, antes da utilização de qualquer um dos critérios acima referidos, há que remover o nível médio do registo de ondas em análise, definindo assim o nível de referência.

### 2.3.2 DISTRIBUIÇÕES E PARÂMETROS REPRESENTATIVOS DAS ONDAS

Sob o ponto de vista da Engenharia Civil, é do maior interesse a caracterização de registos de elevações da superfície da água. Esta caracterização pode ser concretizada através do estudo das distribuições das v.a. associadas ao registo e ao cálculo de parâmetros característicos.

As v.a. mais importantes utilizadas em estudos de caracterização da agitação marítima a curto prazo são as seguintes:

- **Altura de onda,  $H$ .** Para cada onda individual, definida por um dos critérios atrás referidos, determina-se a sua altura através do cálculo do desnível, na vertical, entre o seu ponto mais alto e o seu ponto mais baixo.
- **Período de onda,  $T$ .** Para cada onda individual, o seu período é definido pelo intervalo de tempo entre o seu início e o seu fim.

Com base no conjunto de ondas definidas por utilização de um qualquer critério, podem determinar-se vários parâmetros caracterizadores das ondas de um registo, tais como:

- **Altura máxima,  $H_{max}$ .** A maior altura de onda do registo. Geralmente associa-se a esta altura, o período correspondente, apesar de nem sempre ser este o maior período da série de ondas do registo.
- **Altura significativa,  $H_S$ .** A média do terço de ondas de altura mais elevada do registo.
- **Altura média,  $\bar{H}$ .** A média de todas as alturas de onda do registo.
- **Período máximo,  $T_{max}$ .** O valor máximo dos períodos de onda do registo.
- **Período médio,  $T_Z$ .** A média de todos os períodos de onda do registo.

Um elemento suplementar importante geralmente associado aos parâmetros anteriores, apesar de não ser obtido do registo das elevações, é a **Direcção média das ondas,  $\theta$** .

Ao analisar um grande conjunto de registos de ondas, verifica-se que a v.a. altura de onda (ZUC),  $H$ , exhibe uma distribuição bastante próxima da distribuição de Rayleigh, cujas densidade de probabilidade,  $f(x)$ , e função de distribuição,  $F(x)$ , são, respectivamente, dadas por:

$$f(x) = \frac{x}{4m_0} \exp\left(-\frac{x^2}{8m_0}\right) \quad (2-3)$$

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x^2}{8m_0}\right) \quad (2-4)$$

sendo  $m_0$  uma medida (energia) da área abaixo da função *espectro* (ver Eq. (2-12), mais à frente), e dado por:

$$m_0 = \frac{H_s^2}{16} \quad (2-5)$$

Retira-se também que:

$$\bar{H} = \sqrt{2\pi m_0} \quad (2-6)$$

Longuet-Higgins, 1952, propôs a distribuição de Rayleigh para aplicação às alturas de onda definidas de acordo com o *critério de cava a crista*, o qual não foi apresentado atrás por ser considerado pouco útil. No entanto, verificou-se que a distribuição de Rayleigh é mais adequada às ondas definidas pelo critério ZUC do que às definidas pelo critério de cava a crista, para o qual foi originalmente proposto por Longuet-Higgins, 1952. Como se disse, segundo Pires Silva, 1995, se se adotar o critério orbital, as alturas de onda mais elevadas apresentam ainda um melhor ajuste com as previsões da distribuição de Rayleigh.

Ao adoptar a distribuição de Rayleigh como aproximação da distribuição das alturas de onda, como se faz neste trabalho, possibilita-se o cálculo de uma série de parâmetros de onda com base na manipulação das funções de probabilidade definidas nas Eqs. (2-3) e (2-4).

### 2.3.3 OUTRAS DISTRIBUIÇÕES

Também em relação aos períodos de onda (geralmente, períodos de zero ascendente), podem construir-se histogramas representando a sua distribuição como v.a.. Uma descrição ainda mais completa do estado de mar, a curto prazo, pode ser ainda traduzida pela distribuição bivariada das v.a. altura de onda e período de onda,  $H-T$ , num registo.

## 2.4 DESCRIÇÃO EM FREQUÊNCIA

Para além da descrição no tempo, existe um outro tipo bastante utilizado na análise de sinais. Trata-se da *descrição em frequência*, por vezes também designada por *descrição espectral*. A frequência é, como se sabe, o inverso do período da onda e representa o número de repetições de um certo acontecimento por unidade de tempo.

A descrição em frequência pode ser concretizada através de análise harmónica ou análise espectral do sinal, através da construção de um gráfico representando uma certa grandeza em função da variável frequência. As análises harmónica e espectral permitem apresentar e salientar a informa-

ção mais importante presente num sinal temporal, uma vez que revelam imediatamente periodicidades e padrões ocultos.

A análise em frequência é, assim, uma forma diferente de descrição de uma mesma realidade, que é geralmente a informação contida num sinal explícito no tempo. A “comutação” (domínio do tempo  $\leftrightarrow$  domínio da frequência) é estabelecida através da utilização da *Transformada de Fourier* (TF), ferramenta matemática tratada na chamada *Análise de Fourier*.

O objectivo da análise espectral é fundamentalmente estimar a função de densidade espectral a partir de sinais temporais, por exemplo, referentes a um dado registo das elevações da superfície da água. Como se referiu atrás, o objectivo da simulação é principalmente o oposto: por exemplo, a simulação de ondas com base num espectro é a geração ou síntese de sinais analógicos ou digitais correspondentes a um determinado processo a partir da informação contida no seu espectro de variância.

Para concluir, e considerando que a variável independente é o tempo, pode encarar-se a análise espectral como uma técnica mediante a qual uma dada função no domínio do tempo (sinal) passa ao domínio da frequência (espectro) mercê da TF.

#### 2.4.1 ESPECTRO EM FREQUÊNCIA

O *espectro de variância*,  $p(f)$ , também designado por *densidade espectral*, é formalmente definido como a TF da função de autocovariância de  $Z(t)$ , o processo estocástico do qual  $\eta(t)$  é uma realização. Notar que  $p(f) \in (-\infty, +\infty)$ , e é, portanto, um espectro bilateral.

$$p(f) = TF [c(\tau)] = \int_{-\infty}^{+\infty} c(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (2-7)$$

sendo  $\tau$  um intervalo de tempo qualquer e  $c(\tau)$  a autocovariância de  $Z(t)$ , Carvalho, 1973:

$$c(\tau) = E[Z(t)Z(t+\tau)] \quad (2-8)$$

Pode também definir-se *espectro cruzado* de dois PE  $X(t)$  e  $Y(t)$ ,  $p_{xy}(f)$ , cujos valores médios são nulos, da seguinte forma:

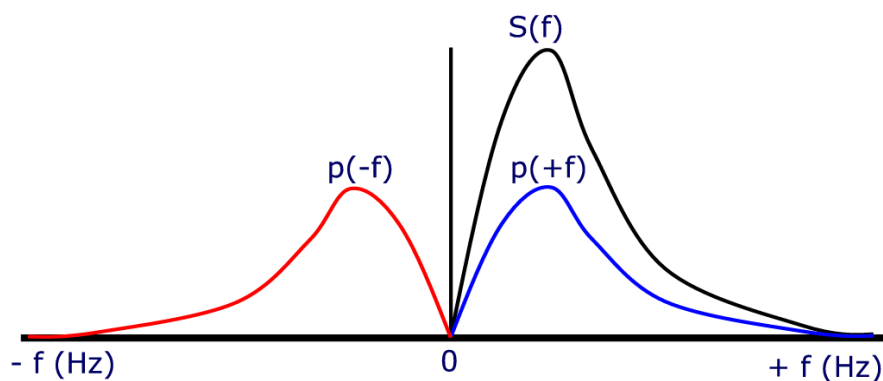
$$p_{xy}(f) = TF [c_{xy}(\tau)] \quad (2-9)$$

sendo

$$c_{xy}(\tau) = E[X(t)Y(t+\tau)] \quad (2-10)$$

No entanto, o que se designa ao longo deste trabalho por *espectro* é o espectro unilateral,  $S(f)$ , que é a soma da parte negativa (referente às frequências negativas) do espectro bilateral,  $p(f)$ , com a correspondente positiva, pelo que, assim (Fig. 2-6),

$$S(f) = 2 p(+f) = 2 \int_0^{+\infty} c(\tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad (2-11)$$



**Fig. 2-6 - Definição de espectros unilateral e bilateral**

Deste modo, o espectro unilateral,  $S(f)$  é definido unicamente no intervalo  $(0, +\infty)$ .

#### 2.4.2 ESTIMAÇÃO DO ESPECTRO

Como se disse, com a análise espectral pretende-se estimar a função de densidade espectral a partir de sinais temporais. A determinação do espectro poderia, no entanto, ser efectuada teoricamente, se se tivesse acesso a pelo menos uma *realização completa* de um PE estacionário e ergódico. Se esta realização se apresentasse sob a forma digital, havia apenas que garantir que essa digitalização era realizada com um  $\Delta t$  suficientemente pequeno para evitar certos problemas numéricos decorrentes da discretização (sobreposição), o que só acontece se o espectro  $S(f)$  for nulo fora de certo intervalo (Carvalho, 1973).

No entanto, na prática nunca se conhece a totalidade de uma realização, mas antes parte ou partes desta. Nunca se consegue, portanto, obter o exacto espectro dessa realização de um PE estacionário e ergódico. Pode, no entanto, obter-se uma sua estimativa.

Para obter numericamente uma estimativa do espectro, pode partir-se da definição dada atrás, Eq. (2-11), utilizando a versão discreta dessa fórmula. Este método é designado por *método indirecto*, dado precisar do cálculo intermédio da autocovariância, Eq. (2-8).

Além deste método de estimação, existe um outro, que produz resultados equivalentes, designado por *método directo*, em que a estimação do espectro é efectuada, directamente, através do cálculo da TF do sinal, seguida de aplicação de *janela espectral*.

Como se disse, ambos os métodos produzem resultados idênticos. Neste trabalho utilizar-se-á o método indirecto por ter um tratamento relativamente simples.

### 2.4.3 PARÂMETROS ESPECTRAIS

Vários *parâmetros espectrais* podem ser determinados a partir da informação espectral fornecida pelos *momentos*  $m_n$  do espectro  $S(f)$  nas frequências  $f_k$ .

$$m_n = \int_0^{+\infty} f^n S(f) df \cong \sum_{k=1}^N f_k^n S(f_k) \Delta f \quad (2-12)$$

Os parâmetros espectrais mais importantes são:

- Altura Significativa,  $H_S$

$$H_S = 4\sqrt{m_0} \quad (2-13)$$

- Largura espectral,  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (2-14)$$

- Período médio de zero ascendente,  $T_Z$

$$T_Z = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2-15)$$

- Centróide (centro de massa) da densidade espectral,  $\bar{f}$

$$\bar{f} = \frac{m_1}{m_0} \quad (2-16)$$

Alguns destes parâmetros serão utilizados nos próximos capítulos, quer na caracterização de grupos de ondas, quer na simulação e/ou modelação numérica e física de registos de ondas. No Capítulo 3 (Secção 3.7.2) serão ainda apresentados outros parâmetros espectrais de especial importância para a caracterização de grupos de onda.

## 2.5 TEORIA DOS SISTEMAS

A *teoria dos sistemas* é, por si só, um tema de elevada complexidade, tratado em numerosas teses e programas de investigação (por exemplo Carvalhal, 1989) e que será de grande utilidade nos capítulos seguintes, como se vai ver.

Em termos simples, um *sistema* é a transformação  $W$  de uma função de  $x(t)$ , a *entrada ou excitação*, noutra função  $y(t)$ , a *saída ou resposta*, ou seja:

$$y(t) = W[x(t)] \quad (2-17)$$

Um sistema é *linear* quando a resposta,  $y(t)$ , a uma dada excitação,  $x(t)$ , tem as propriedades aditiva e homogénea, ou seja:

- A resposta de uma soma de excitações deve ser igual à soma das respostas produzidas por cada excitação considerada separadamente,

$$W [(x_1(t)+x_2(t))] = W[x_1(t)] + W[x_2(t)] \quad (2-18)$$

- A resposta produzida por uma constante,  $c$ , vezes uma excitação deve ser igual à resposta produzida pela excitação simples vezes essa constante  $c$ ,

$$W [cx_1(t)] = cW[x_1(t)] \quad (2-19)$$

A propriedade aditiva tem relação directa com o chamado *princípio da sobreposição*, ao passo que a propriedade homogénea consubstancia a da independência em relação à escala do fenómeno em estudo (Carvalho, 1989).

Evidentemente, um sistema diz-se *não linear* se não satisfaz as propriedades aditiva e/ou homogénea acima referidas.

Por outro lado, um sistema é *invariante no tempo* se, para qualquer intervalo de tempo,  $\tau$ , se verificar

$$W [x(t+\tau)] = W[x(t)] \quad (2-20)$$

Dado um sistema linear com sinal de entrada,  $x(t)$ , e correspondente sinal de saída,  $y(t)$ , Fig. 2-7,



**Fig. 2-7 - Sistema linear com entrada  $x(t)$  e saída  $y(t)$**

Define-se *função de resposta a impulso* (*impulse response function*) do sistema,  $h(t)$ , pela seguinte operação de convolução:

$$y(t) = h(t) \otimes x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t-\tau)x(\tau) d\tau \quad (2-21)$$

A função de transferência (transfer function) do sistema,  $H(f)$ , é a transformada de Fourier (TF) de  $h(t)$ :

$$H(f) = TF[h(t)] \quad (2-22)$$

Demonstra-se, Carvalho, 1973, que, se forem  $p_x(f)$  e  $p_y(f)$ , respectivamente, os espectros bilaterais do sinal de entrada,  $x(t)$ , e do sinal de saída,  $y(t)$ ; e  $p_{xy}(f)$  o espectro cruzado de  $x(t)$  e  $y(t)$ ,

$$p_y(f) = |H(f)|^2 p_x(f) \quad (2-23)$$

e

$$p_{xy}(f) = H(f) p_x(f) \quad (2-24)$$

pelo que, para gerar um sinal  $y(t)$  com espectro  $p_y(f)$ , há que calcular  $h(t)$  por

$$h(t) = TF^{-1}[H(f)] = TF^{-1} \left[ \sqrt{\frac{p_y(f)}{p_x(f)}} \right] = TF^{-1} \left[ \frac{p_{xy}(f)}{p_x(f)} \right] \quad (2-25)$$

Pode definir-se também o chamado *ganho do sistema*,  $e(f)$ , o qual é dado por:

$$e(f) = |H(f)| \quad (2-26)$$

De acordo com Carvalhal, 1989, "*Na realidade, um sistema linear constitui uma abstracção ou simplificação dos sistemas físicos naturais (sistemas reais); pode dizer-se que na Natureza não existem, em princípio, sistemas lineares. No entanto, a vasta experiência acumulada mostra que a admissão da hipótese da linearidade relativamente a grande número de sistemas reais é perfeitamente razoável e aceitável (devendo, contudo, ter-se em consideração os "desvios" daí decorrentes), para além de extremamente útil, dado fornecer meios para o seu estudo e tratamento*".

Também, Bendat e Piersol, 1986, consideram que as características de saída ou resposta para a quase totalidade dos sistemas físicos reais podem considerar-se lineares, pelo menos para uma gama limitada de entradas, sem que ocorram erros assinaláveis.

Neste trabalho, vai admitir-se a hipótese da linearidade do sistema  $\{x(t) - \text{movimento do batedor}, \eta(t) - \text{elevação da superfície da água no canal ou tanque}\}$ . Esta linearidade, consubstancia, como se disse, os princípios da sobreposição de efeitos, Eq. (2-18), e da independência da escala do sistema, Eq. (2-19). Vai admitir-se também que este sistema (pelo menos aproximadamente) é invariante no tempo, Eq. (2-20).

## 2.6 TEORIA LINEAR DA ONDA

As *ondas marítimas* são, em termos simples, oscilações da superfície livre, as quais, na natureza, são geradas maioritariamente pelo vento e, no laboratório, são geradas em canal ou tanque por meio de um *batedor de ondas*.

Neste trabalho admite-se, por hipótese, que as ondas marítimas são *ondas lineares*, isto é, são modeladas pela *teoria linear*.

A teoria linear, ou *teoria de Airy*, é um conjunto de soluções determinísticas para a descrição da onda de gravidade desenvolvido a partir da *equação de Laplace*, admitindo certas hipóteses e simplificações (Mota Oliveira, 1985). Esta teoria, que ignora os termos não lineares, é válida apenas para *ondas de pequena amplitude* e admite a hipótese da *irrotacionalidade* do escoamento do fluido (água).

A seguir, apresentam-se alguns resultados da teoria linear da onda com utilidade para o que se segue nos próximos capítulos.

Ao utilizar a teoria linear da onda, admite-se, como se disse, que as ondas são de pequena amplitude, cilíndricas, com cristas rectilíneas e propagando-se sobre fundo plano no sentido positivo do eixo dos  $x$ , o que permite a determinação da *função potencial da velocidade*,  $\phi(x, z, t)$ , da seguinte forma:

$$\phi(x, z, t) = \frac{g \cosh[k(z+d)]}{\omega \cosh(kd)} \eta(t) \quad (2-27)$$

com

$$\eta(t) = a \sin(kx - \omega t) \quad (2-28)$$

sendo

$\eta(t)$  - a elevação da superfície livre, relativamente ao nível médio,

$a$  - a amplitude de onda ( $a = H/2$ );

$H$  - a altura de onda;

$g$  - a aceleração da gravidade;

$z$  - a ordenada, contada do nível médio da superfície da água;

$d$  - a profundidade da água (o fundo está a  $z = -d$ );

A *velocidade angular*,  $\omega$ , e o *número de onda*,  $k$ , são dados, respectivamente, por

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2-29)$$



$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (2-30)$$

O comprimento de onda,  $L$ , e o período de onda,  $T$ , não são independentes. Realmente, a chamada *relação de dispersão*

$$\omega^2 = kg \tanh(kd) \quad (2-31)$$

dá sucessivamente

$$\frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{2\pi g}{L} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2-32)$$

$$L = T^2 \frac{g}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2-33)$$

Para obter  $L$ , esta equação pode ser resolvida numericamente, por iterações sucessivas.

Para *grandes profundidades* ( $kd$  grande), vem

$$\tanh(kd) \cong 1 \quad (2-34)$$

o que dá o comprimento de onda ao largo,  $L_0$ :

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 = L_0 \quad (2-35)$$

resultado que, aliás, se pode usar como valor inicial para a resolução por iterações da Eq. (2-33). De acordo com Elias, 1988, pode usar-se também a seguinte fórmula aproximada, que fornece  $L$  em função de  $T$ :

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 = L_0 \quad \text{para } \frac{d}{L_0} \geq 0.6 \quad (2-36)$$

$$L = T\sqrt{gd} \left(1 - \frac{\pi d}{3L_0}\right) \left[1 + 3.102 \left(\frac{d}{L_0}\right)^{4.11}\right] \quad \text{para } \frac{d}{L_0} \leq 0.6 \quad (2-37)$$

A *componente horizontal da velocidade das partículas*,  $u$ , num ponto de coordenadas  $(x, z)$ , é calculada a partir do potencial de velocidade, dado pela Eq. (2-27):

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{kag \cosh[k(z+d)]}{\omega \cosh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (2-38)$$

Por outro lado, da Eq. (2-31) retira-se que

$$kg = \frac{\omega^2}{\tanh(kd)} \quad (2-39)$$

Logo,

$$u = \frac{\omega^2}{\tanh(kd)} \frac{a \cosh[k(z+d)]}{\omega \cosh(kd)} \cos(kx - \omega t)$$

$$u = \frac{\omega a \cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos(kx - \omega t)$$

$$u = \frac{ck \cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \eta(t) \quad (2-40)$$

com a *celeridade ou velocidade de fase*,  $c$ , dada por

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{L}{T} \quad (2-41)$$

Notar que, para grandes profundidades ( $L = L_0$ ), a celeridade depende apenas do período,  $T$ .

Este resultado da teoria linear de onda será útil na Secção 5.7.1 do Capítulo 5.

## 2.7 CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentaram-se de uma forma muito sumária vários métodos e ferramentas destinados à caracterização de ondas. Para essa caracterização há dois tipos de análise possíveis, uma no domínio do tempo, outra no domínio da frequência. A primeira surge como mais óbvia e, de facto, permite uma percepção imediata do tipo de agitação marítima em estudo. No entanto, verifica-se que este tipo de análise não permite detectar aspectos energéticos tão bem como a análise em frequência.

Pode afirmar-se que, para uma caracterização da agitação marítima suficientemente completa, é necessário usar os dois tipos de análise, sendo que ambas as perspectivas são formas diferentes de descrição de uma mesma realidade, que é a informação contida num registo temporal. A Transformada de Fourier (TF) é a ferramenta matemática que permite a passagem do domínio do tempo para o domínio da frequência e vice-versa.

Com base no tratamento espectral, foram definidos parâmetros importantes de caracterização de ondas, que serão úteis nos desenvolvimentos dos próximos capítulos.

Os sistemas lineares foram também aqui abordados, visto serem frequentemente utilizados quer na simulação numérica, quer na simulação e modelação física, temas tratados mais à frente.

Também a teoria linear da onda, pela sua importância, foi brevemente abordada neste capítulo.

# CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO DE GRUPOS DE ONDAS

---

## 3.1 INTRODUÇÃO

As análises no tempo e em frequência dos registos de elevações da superfície do mar não esgotam a caracterização da agitação marítima. A consideração de *grupos de ondas*, isto é, conjuntos de ondas sucessivas cujas cristas (ou alturas) estão acima de um certo *nível de agrupamento*,  $v$  (ou de uma certa *altura de onda*,  $H_c$ ), é igualmente importante.

Burcharth, 1979, entre outros, investigou a importância do impacto de sucessões de ondas em estruturas costeiras. Este autor verificou existir uma influência significativa do tipo de ondas que solicitam uma determinada obra marítima e os estragos causados. Por exemplo, confirmou que a existência de uma mudança brusca na altura de onda, provoca uma solicitação muito severa nas obras marítimas. Por isso, este autor assinala a necessidade da utilização de parâmetros de agrupamento de ondas na análise da agitação marítima.

De facto, por um lado, uma sucessão de ondas de grande altura é mais prejudicial à estabilidade das obras marítimas que a ocorrência das mesmas ondas intervaladas com ondas de menor altura (Johnson *et al.*, 1978). Por outro lado, as *ondas longas ligadas*, que estão associadas aos grupos de ondas, podem eventualmente provocar ressonância muito perniciosa nos sistemas navios-amarras.

Neste capítulo, considerar-se-ão vários métodos de caracterização de grupos de ondas susceptíveis de associação a efeitos em obras marítimas ou navios amarrados. Nos dois capítulos seguintes, abordar-se-ão, entre outros, os problemas da simulação de registos contendo grupos de ondas em computador e em ensaios físicos.

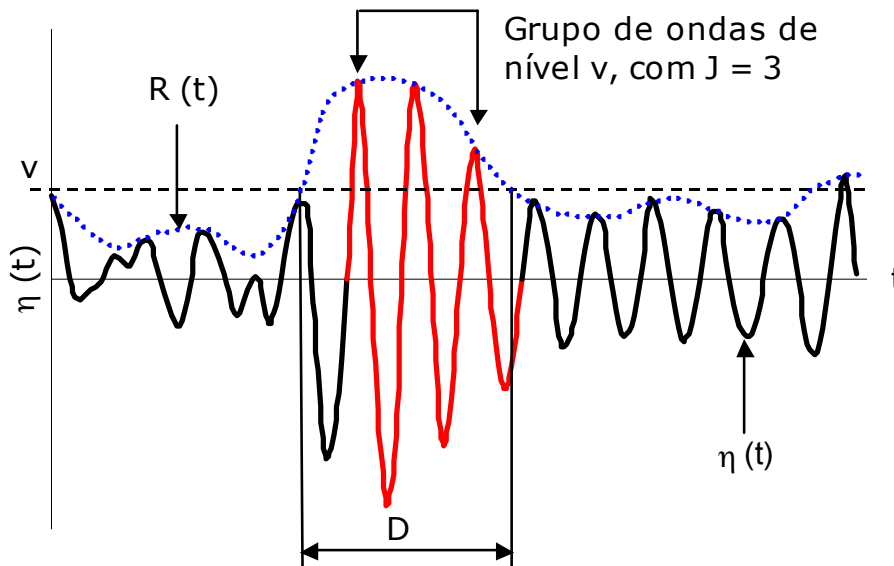
## 3.2 GENERALIDADES SOBRE CARACTERIZAÇÃO DE GRUPOS DE ONDAS

A maneira mais óbvia de caracterizar um certo estado de mar, no que diz respeito aos grupos de ondas, consiste na contagem do número de ondas,  $J$ , de cada sequência cujas cristas excedam um dado nível de agrupamento,  $v$  (Fig. 3-1). À média do número de ondas das sequências assim encontradas em cada registo chama-se *valor médio do número de ondas dos grupos de on-*

das de nível  $v$ ,  $E[J]$ . Por outro lado, podem-se contar os números,  $G$ , de ondas entre dois começos sucessivos de grupos de nível  $v$ , e calcular o respectivo valor médio no registo,  $E[G]$ . Este tipo de caracterização de grupos de ondas assume uma *perspectiva discreta*.

Analogamente, sob o *ponto de vista contínuo*, podem caracterizar-se os grupos de ondas através do cálculo da *duração do grupo de ondas*,  $D$ , isto é, o intervalo de tempo durante o qual as cristas das ondas do grupo se mantêm acima de  $v$  (Fig. 3-1). À média das durações dos grupos ao longo do registo chama-se *valor médio da duração dos grupos de ondas de nível  $v$* ,  $E[D]$ . Para este tipo de caracterização, usa-se frequentemente a noção de *envolvente* de um registo ou realização,  $\eta(t)$ , a qual é uma função,  $R(t)$ , cujo gráfico liga as cristas de  $\eta(t)$ .

Em ambos os tipos de caracterização, denota-se por  $N_G$  o *número de grupos de ondas de nível  $v$*  num registo.



**Fig. 3-1 - Grupo de ondas de nível  $v$  e sua duração**

Desde que se conheça o período médio (ZUC) do registo,  $T_z$ , é fácil relacionar aproximadamente os valores médios das duas variáveis  $J$  e  $D$ , relativas às perspectivas discreta e contínua, respectivamente, da seguinte forma:

$$E[D] = T_z E[J] \quad (3-1)$$

sendo:

$E[D]$  - o valor médio da duração dos grupos de ondas, medido em unidades de tempo;

$T_z$  - o período médio (de zero ascendente) das ondas;

$E[J]$  - o valor médio do número de ondas dos grupos de ondas.

Notar que, se for possível dispor das distribuições de  $J$  e  $D$ , será praticável obter outros parâmetros de interesse para além de  $E[J]$  e de  $E[D]$ . Nas Secções 3.3 e 3.4, serão apresentadas distribuições plausíveis para  $J$  e  $D$  e obtidos alguns parâmetros.

Têm sido propostos vários métodos para caracterizar directa ou indirectamente os grupos de ondas, a partir de propriedades gerais dos registos:

- o **método directo**,
- o **método dos chorrilhos** (Goda, 1976; Black, 1978) e um seu refinamento, designado por **método de Kimura Espectral** (Kimura, 1980, 1988)
- o **método da envolvente (clássica)** (Nolte e Hsu, 1972; Goda, 1970)
- o **método EIA/SIWEH** (Funke e Mansard, 1979)
- o **método REIA**, apresentado neste trabalho

O *método directo* consiste em determinar directamente, a partir do próprio registo, toda a informação respeitante aos grupos de ondas que realmente ocorrem. Para cada nível  $v$  considerado, pode calcular-se, por exemplo,

- a distribuição do número,  $J$ , de ondas em cada grupo de onda;
- o valor médio do número de ondas dos grupos de ondas,  $E[J]$ ;
- a sua variância,  $var[J]$ ;
- a distribuição do número,  $G$ , de ondas entre começos de dois grupos sucessivos;
- o seu valor médio,  $E[G]$ ;
- a sua variância,  $var[G]$ ;
- a distribuição do número de grupos de ondas do registo,  $N_G$ ;
- o valor médio do número de grupos de ondas dos registos,  $E[N_G]$  ;
- a distribuição da duração,  $D$ , de cada grupo de ondas;
- o valor médio,  $E[D]$ ;
- a sua variância,  $var[D]$ ;
- etc.

Este método conduz a resultados de referência, isto é, aqueles que serão tomados como mais correctos, quando comparados com resultados correspondentes aos *métodos indirectos*, isto é, métodos que não tomam em consideração o próprio registo de ondas.

Os restantes cinco métodos, acima mencionados, são métodos indirectos, e neles procuram-se variáveis ou parâmetros que, de algum modo, caracterizem os grupos de ondas. Claramente, uma variável de maior interesse é a duração do grupo,  $D$  (Fig. 3-1), com os consequentes parâmetros valor médio,  $E[D]$ , variância,  $var[D]$ , etc..

Em resumo, podem, assim, seguir-se duas vias para o tratamento teórico dos grupos de ondas:

- 1** **Através da série de alturas de onda**, com o *método dos chorrilhos* (MC), o *método de Kimura* (MK) e o *método de Kimura Espectral* (KE), em que se aborda, como já se disse atrás, a caracterização dos grupos de ondas numa perspectiva discreta (Secção 3.3).
- 2** **Através da envolvente das ondas** com o *método da envolvente* (ENV), o *método da envolvente* de Rice/Hilbert (RH e RHa), as *fórmulas de Longuet-Higgins*(LH) e o *método REIA* (REIA), em que se considera uma perspectiva contínua da mesma caracterização (Secção 3.4).

Segundo Tucker, 1991, a primeira das abordagens é mais adequada quando o espectro do registo em análise é largo, ao passo que a segunda é melhor para os registos de espectros mais estreitos. A seguir, discutem-se com mais pormenor estas duas perspectivas de abordagem dos grupos de ondas.

### **3.3 CARACTERIZAÇÃO DE GRUPOS DE ONDAS ATRAVÉS DAS ALTURAS DE ONDA**

Para a caracterização de grupos de ondas através das alturas de onda, abordam-se os seguintes métodos, numa perspectiva discreta: o *método dos chorrilhos*, o *método de Kimura* e o *método de Kimura Espectral*.

O *método dos chorrilhos* (*method of runs*) foi proposto, entre outros, por Goda, 1976 e Black, 1978. Este método não teve muito sucesso, dadas as suas limitações, que se mencionam mais à frente. Por isso, sofreu um refinamento, conhecido por *método de Kimura* (Kimura, 1980), que melhorou bastante as suas possibilidades de utilização. Este refinamento envolve as designadas *cadeias de Markov*.

Porém, uma desvantagem do método de Kimura, tal como foi apresentado inicialmente, era o facto de o parâmetro que define as características do agrupamento não se encontrar estabelecido em termos do espectro de energia do processo em estudo.

Assim, Battjes e Vledder, 1984, através da utilização de algumas fórmulas espectrais devidas a Battjes (Battjes, 1974), propuseram um parâmetro espectral apropriado para eliminar essa deficiência do método, pelo que o método de Kimura passou a ser conhecido por *Kimura Espectral* (que, com mais justiça, deveria ser conhecido por Kimura-Battjes).

3.3.1 MÉTODO DOS CHORRILHOS

Chama-se *chorrilho* a uma sucessão de *experiências de Bernoulli*<sup>2</sup> com um mesmo resultado: êxitos ou fracassos. O chorrilho aplicado às ondas é o que se tem designado por grupo de ondas, com a equivalência a fazer-se da seguinte forma:

|                        |   |
|------------------------|---|
| <b>êxito</b>           | <i>Altura de onda, H, faz parte de um grupo de ondas (<math>H &gt; H_c = 2v</math>)</i> |
| <b>fracasso</b>        | $H \leq H_c = 2v$   |
| <b>chorrilho</b>       | <i>grupo de ondas</i>   |
| <b>chorrilho total</b> | Conjunto de ondas entre começos de dois grupos de ondas sucessivos                      |

Assim, nesta teoria, a v.a.  $J$  (número de ondas dos grupos de ondas) é o *número de ondas do chorrilho*, ou seja, o número de experiências do chorrilho, e  $G$ , o número de ondas entre dois grupos de ondas sucessivos, é o *chorrilho total*, isto é, o conjunto formado por dois chorrilhos sucessivos de tipo diferente (êxitos seguidos de fracassos ou vice-versa).

Deste modo, um grupo de ondas é definido como uma sequência de alturas de onda ( $H_i, i = 1, 2, 3...$ ) acima de uma determinada altura,  $H_c = 2v$ , assim precedido e continuado por uma onda de altura inferior a  $H_c$ .

A hipótese que está na base da teoria dos chorrilhos, que consiste em considerar cada elemento do chorrilho uma experiência de Bernoulli, traduz-se, quando aplicada aos grupos de ondas, em admitir que alturas de onda diferentes são independentes e que é constante a probabilidade,  $p$ , de uma qualquer altura,  $H$ , exceder o valor  $H_c$ . Tem-se, então:

$$p = \text{Probabilidade de êxito} = P [H > H_c] = P[H \in \text{chorrilho}]$$

$$q = \text{Probabilidade de fracasso} = P [H \leq H_c] = 1 - p$$

Sabe-se da teoria elementar da probabilidade que a variável  $J$  tem uma distribuição geométrica, ou seja, a massa de probabilidade de  $J$  é dada por

$$P[J = n] = \text{Probabilidade de ocorrerem } n \text{ êxitos até ao primeiro fracasso} =$$

$$= \text{Probabilidade de ocorrerem } n \text{ êxitos entre dois fracassos} =$$

$$= (1-p) p^{n-1} = q p^{n-1}$$

<sup>2</sup> A *experiência de Bernoulli* é uma experiência aleatória com dois únicos resultados, que se costumam designar por êxito (com probabilidade  $p$ ) e fracasso (com probabilidade  $q = 1 - p$ ). Num conjunto de experiências de Bernoulli, admite-se que elas são independentes.

Os parâmetros valor médio e variância da variável  $J$  são dados por

$$E[J] = \frac{1}{1-p} \quad (3-2)$$

$$\text{var}[J] = \frac{p}{(1-p)^2} \quad (3-3)$$

É fácil de ver, ainda, que

$$P[G=n] = \frac{pq}{q-p}(q^{n-1} - p^{n-1}) \quad (3-4)$$

$$E[G] = \frac{1}{pq} \quad (3-5)$$

Goda, 1970, assumiu que as alturas de onda,  $H$ , eram v.a. independentes com a distribuição de Rayleigh. Nestas circunstâncias, tem-se, por exemplo, para  $H_s$  (altura significativa), Eq. (2-4),

$$p = P[H > H_s] = 1 - F(H_s) = \exp\left(-\frac{H_s^2}{8m_0}\right) = \exp\left(-\frac{16m_0}{8m_0}\right) = \exp(-2) = 0.135$$

e, por isso, conclui-se, segundo esta teoria, que o número médio de ondas dos grupos de ondas com alturas que excedem, por exemplo, a altura significativa,  $H_s$ , ou seja, de um grupo de ondas de nível  $v = H_s/2$ , é de  $1/0.865 = 1.16$  ondas. Por outro lado, para o mesmo exemplo,  $E[G] = 8.56$  ondas.

Esta teoria, permite, de algum modo, fazer uma caracterização estatística dos grupos de ondas, mas a hipótese que lhe está na base (que, como se viu, consiste em admitir que alturas de onda diferentes são independentes e que é constante a probabilidade,  $p$ , de uma qualquer altura,  $H$ , exceder o valor  $H_c$ ) é bastante duvidosa, para não dizer totalmente incorrecta. Por isso, não é de admirar que os resultados teóricos que produz não sejam corroborados na prática, como mostra Vledder, 1983.

Neste trabalho, Vledder conclui, de estudos de vários autores, que os valores do número médio de ondas dos grupos estimados a partir de registos reais são sempre maiores que os previstos pela teoria dos chorrilhos, o que é também confirmado nos resultados apresentados no presente capítulo deste trabalho.

Na verdade, já Rye, 1974, tinha verificado que existe correlação entre as alturas de onda reais. Segundo Rye, 1974, o coeficiente de correlação de ordem  $m$  das alturas de onda de um registo (ou seja, entre as alturas de onda de ordem  $k$  e  $k+m$ ) é dado por:

$$r_m = \frac{1}{\sigma^2(N-m)} \sum_{k=1}^{N-m} (h_k - \bar{H})(h_{k+m} - \bar{H}) \quad (3-6)$$



sendo:

- $h_k$  - as altura das ondas sucessivas do registo;
- $\bar{H}$  - a altura média das ondas do registo;
- $\sigma$  - o desvio-padrão das alturas de onda do registo.

Os valores de  $r_m$  obtidos com esta equação, na prática, estão longe de ser próximos de zero. Por isso, o método dos chorrilhos (MC), tal como foi proposto por Goda, 1976, tem de ser rejeitado.

### 3.3.2 MÉTODO DE KIMURA

Kimura, 1980, veio dar um importante contributo ao estudo dos grupos de onda ao apresentar um refinamento da teoria dos chorrilhos que considera não nula a correlação entre alturas de onda sucessivas. Este refinamento envolve as designadas *cadeias de Markov*, descritas a seguir.

#### 3.3.2.1 CADEIAS DE MARKOV

Considerem-se  $M$  variáveis aleatórias  $H_n$ , representando  $M$  alturas de onda sucessivas, cada uma com dois estados possíveis,  $a_1$  e  $a_2$  (que, nas aplicações, se entenderão, respectivamente, como " $\leq H_c$ " e " $> H_c$ "). Supor-se-á que estas v.a. formam uma cadeia de Markov de 1ª ordem (Parzen, 1964). Sejam  $n, m, r$  e  $s$ , variáveis auxiliares. Designe-se

$$p_i(n) = P[H_n = a_i] = P[H_n \text{ está no estado } i]$$

$$p_{ij}(n, m) = P[H_n = a_i | H_m = a_j] = P[H_n \text{ está no estado } i | H_m \text{ está no estado } j]$$

Assim, tem-se

$$p_1(n) = P[H_n = a_1] = P[H_n \text{ está no estado } 1] = P[H_n < H_c]$$

$$p_2(n) = P[H_n = a_2] = P[H_n \text{ está no estado } 2] = P[H_n > H_c]$$

Pode, pois, definir-se o vector linha, que representa a distribuição probabilística de  $H_n$  pelos estados:

$$p(n) = [p_1(n) \quad p_2(n)] = [P[H_n = a_1] \quad P[H_n = a_2]] = [P[H_n \leq H_c] \quad P[H_n > H_c]]$$

e a matriz que representa a distribuição probabilística de  $H_n$  pelos estados, condicionada à de  $H_m$ :

$$p(n, m) = \begin{bmatrix} p_{11}(n, m) & p_{12}(n, m) \\ p_{21}(n, m) & p_{22}(n, m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P[H_n = a_1 | H_m = a_1] & P[H_n = a_1 | H_m = a_2] \\ P[H_n = a_2 | H_m = a_1] & P[H_n = a_2 | H_m = a_2] \end{bmatrix}$$

Notar que os índices de  $p$  se referem aos estados. É, por outro lado, fácil de ver que, pelo teorema das probabilidades totais, Papoulis, 1965, se tem

$$P[H_n = a_i] = P[H_n = a_i | H_m = a_1] P[H_m = a_1] + P[H_n = a_i | H_m = a_2] P[H_m = a_2]$$

ou seja,

$$p_i(n) = p_{i1}(n, m) p_1(n) + p_{i2}(n, m) p_2(n) = \sum_j p_{ij}(n, m) p_j(m) \quad (3-7)$$

sendo também fácil de ver que

$$p_1(n) + p_2(n) = \sum_i p_i(n) = 1 \quad (3-8)$$

$$p_{1j}(n, m) + p_{2j}(n, m) = \sum_i p_{ij}(n, m) = 1 \quad (3-9)$$

Podemos também provar-se a chamada igualdade de Chapman-Kolmogorov:

$$p_{ij}(n, m) = \sum_{k=1}^2 p_{ik}(n, r) p_{kj}(r, m) \text{ com } m < r < n \quad (3-10)$$

Utilizando o vector e a matriz acima, pode escrever-se, a partir de (3-7),

$$p(n) = p(s) \cdot p(n, s) \quad (3-11)$$

e a partir de (3-10),

$$p(n, s) = p(n, r) \cdot p(r, s) \quad (3-12)$$

Supondo que é *homogénea* a cadeia de Markov, isto é, que as probabilidades condicionais  $p_{ij}(n, m)$  só dependem da diferença  $n - m$ , e sendo

$$p(n-s) = [p_{ij}(n-m)] \quad (3-13)$$

tem-se, para  $n - m = 1$ ,

$$\Pi = p(1) = [p_{ij}(1)] = \begin{bmatrix} P[H_{k+1} = a_1 | H_k = a_1] & P[H_{k+1} = a_1 | H_k = a_2] \\ P[H_{k+1} = a_2 | H_k = a_1] & P[H_{k+1} = a_2 | H_k = a_2] \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

ou

$$\Pi = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

com

$$p_{ij} = p_{ij}(1) = P[H_{k+1} = a_i | H_k = a_j] = P[H_{k+1} \text{ no estado } i | H_k \text{ no estado } j] \quad (3-16)$$

onde

$$i, j = 1, 2$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

$H_k$  e  $H_{k+1}$  representam alturas de onda sucessivas

o estado 1 corresponde a valores de  $H$  inferiores ou iguais a  $H_c$

o estado 2 corresponde a valores de  $H$  superiores a  $H_c$

As probabilidades  $p_{ij}$  são calculadas, admitindo para a v.a.  $H$  a distribuição de Rayleigh e para os pares  $(H_k, H_{k+1})$  a distribuição bivariada de Rayleigh [ver Eq. (3-24), mais à frente], com o coeficiente de correlação  $r$  entre alturas sucessivas dado pela Eq. (3-6),  $r = r_1$ .

A matriz  $\Pi$  é, assim, a matriz de 1ª transição, que relaciona as distribuições referentes a uma onda com a seguinte.

Notar que

$$p_{11} = P[H_{k+1} = a_1 | H_k = a_1] = P[H_{k+1} < H_c | H_k < H_c] \quad P[H_{k+1} \text{ } \frac{3}{4} \text{ a um chorrilho}]$$

$$p_{12} = P[H_{k+1} = a_1 | H_k = a_2] = P[H_{k+1} < H_c | H_k > H_c] \quad P[H_k \text{ é a última onda dum chorrilho}]$$

$$p_{21} = P[H_{k+1} = a_2 | H_k = a_1] = P[H_{k+1} > H_c | H_k < H_c] \quad P[H_{k+1} \text{ é a 1ª onda dum chorrilho}]$$

$$p_{22} = P[H_{k+1} = a_2 | H_k = a_2] = P[H_{k+1} > H_c | H_k > H_c] \quad P[H_{k+1} \text{ } \frac{1}{2} \text{ a um chorrilho}]$$

### 3.3.2.2 APLICAÇÃO DAS CADEIAS DE MARKOV AOS GRUPOS DE ONDAS

O refinamento de Kimura, 1980, da teoria dos chorrilhos consiste, como se disse atrás, em considerar não nula a correlação entre alturas de onda sucessivas, admitindo a sucessão de ondas modelada por uma cadeia de Markov de 1ª ordem, com matriz de 1ª transição dada por (3-15).

Antes de pormenorizar o cálculo dos valores  $p_{ij}$ , veja-se como vão ser utilizados. De acordo com o que se viu na Secção 3.3.1, o papel de  $p$  na teoria simples dos chorrilhos é agora desempenhado por  $p_{22}$ , com a diferença de que, agora, ondas sucessivas não são consideradas independentes, isto é:

$$p = P[\text{êxito}] = P[H_{k+1} \text{ } \frac{1}{2} \text{ chorrilho}] = P[H_{k+1} > H_c | H_k > H_c] = p_{22} \quad (3-17)$$

Consequentemente, sendo, como se sabe,  $J$  a variável número de ondas do chorrilho, tem-se, substituindo  $p$  por  $p_{22}$  nas expressões da Secção 3.3.1:

$$P[J = n] = (1-p_{22}) p_{22}^{n-1} \quad (3-18)$$

$$E[J] = \frac{1}{1-p_{22}} \quad (3-19)$$

$$var[J] = \frac{p_{22}}{(1-p_{22})^2} \quad (3-20)$$

Analogamente, para o número de ondas do chorrilho total, isto é, para o número de ondas existente entre começos sucessivos de grupos de ondas,  $G$ , ter-se-á:

$$P[G = n] = \frac{p_{22}(1-p_{22})}{1-2p_{22}} [(1-p_{22})^{n-1} - p_{22}^{n-1}] \quad (3-21)$$

$$E[G] = \frac{1}{p_{22}(1-p_{22})} \quad (3-22)$$

Dispõe-se, portanto, da caracterização estatística completa de  $J$  e  $G$ , o que permitirá calcular outros parâmetros, como se verá adiante. Antes disso, porém, veja-se, então, como calcular  $p_{22}$ .

Tem-se,

$$p_{22} = P[H_{k+1} > H_c \mid H_k > H_c] = \frac{P(H_{k+1} > H_c; H_k > H_c)}{P(H_k > H_c)} = \frac{\int_{H_c}^{+\infty} \int_{H_c}^{+\infty} f(x, y) dx dy}{\int_{H_c}^{+\infty} f(x) dx} \quad (3-23)$$

em que os integrandos do denominador e do numerador são, respectivamente, a densidade da distribuição univariada de Rayleigh, calculada a partir da Eq. (2-4), e a densidade da distribuição bivariada de Rayleigh<sup>3</sup>, cuja fórmula se apresenta seguidamente:

$$f(x, y) = \frac{xy}{16m_0^2(1-\kappa^2)} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{8m_0(1-\kappa^2)}\right) \cdot I_0\left(\frac{\kappa xy}{4m_0(1-\kappa^2)}\right) \quad (3-24)$$

sendo:

$I_0(\ )$ , a função de Bessel modificada de ordem zero;

$\kappa$ , o parâmetro determinado a partir da relação apresentada por Kimura, 1980, entre  $r$  e  $\kappa$ :

$$r = \frac{E(\kappa) - \frac{(1-\kappa^2)K(\kappa)}{2} - \frac{\pi}{4}}{1 - \frac{\pi}{4}} \quad (3-25)$$

<sup>3</sup> A fórmula (3-24) aparece em Medina e Hudspeth, 1990, e é equivalente às apresentadas por Rice, 1954, Kimura, 1980, Vledder, 1992, etc. Ver **Anexo 3 - Deduções Matemáticas**.

$E(\ )$  e  $K(\ )$ , os integrais elípticos completos de 1ª e 2ª espécie, respectivamente;

$r$ , o coeficiente de correlação entre alturas sucessivas,  $r = r_1$ , Eq. (3-6).

Assim, com o método de Kimura (MK), a partir do valor de  $r$ , calculado da sucessão de alturas do registo, Eq. (3-6), obtém-se  $\kappa$ , pela Eq. (3-25) e, em seguida, calcula-se  $\rho_{22}$ , através das Eqs. (2-4), (3-24) e (3-23), o que é um procedimento pouco prático.

### 3.3.3 MÉTODO DE KIMURA ESPECTRAL

Apesar de o método de Kimura, referido na secção anterior, produzir bons resultados, verifica-se que a maior parte da informação sobre o estado do mar disponível é geralmente apresentada sob a forma de um espectro de variância da elevação da superfície do mar, não sendo, normalmente, habitual possuir-se o registo das alturas de onda desse estado de mar. O coeficiente de correlação  $r$ , Eq. (3-6), e o parâmetro  $\kappa$ , calculado através da utilização da Eq. (3-25), são, nessas circunstâncias, impossíveis de determinar. Torna-se, portanto, necessário determinar outros parâmetros que possam caracterizar os grupos de ondas em função das características do espectro.

Foi o que fizeram Battjes e Vledder, 1984 (ver também Vledder, 1992, e Masson e Chandler, 1993). Efectivamente, Battjes, 1974, mostrara que o parâmetro  $\kappa$  pode ser calculado directamente a partir do espectro  $S(f)$  pela fórmula

$$\kappa = \frac{1}{m_0} \sqrt{\left[ \int_0^{+\infty} S(f) \cos(2\pi f \tau) df \right]^2 + \left[ \int_0^{+\infty} S(f) \sin(2\pi f \tau) df \right]^2} \quad (3-26)$$

onde  $\tau$  é o intervalo de tempo entre ondas sucessivas,

$$\tau \approx T_Z = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (3-27)$$

Ainda segundo Battjes, 1974, a Eq. (3-25) é muito bem aproximada por

$$r = \frac{\pi}{16 - 4\pi} \left( \kappa^2 + \frac{\kappa^4}{16} + \frac{\kappa^6}{64} \right) \quad (3-28)$$

com erro menor que 0.1 %, para  $\kappa \in (0, 0.7)$ , e menor que 1 %, para  $\kappa \in (0.7, 0.95)$ , segundo Vledder, 1992.

Foi com este procedimento, via espectro, para o cálculo de  $\kappa$  e de  $r$ , apresentado por Battjes e Vledder, 1984, que o método de Kimura, 1980, passou a ser conhecido por *método de Kimura Espectral* (KE)<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Ver fórmulas (4) e (5) de Battjes e Vledder, 1984, comparadas com o coeficiente de correlação habitual (3).

Notar que, para o cálculo de  $p_{22}$  a partir de um registo, não é necessário calcular  $r$ , mas poderá haver utilidade em conhecê-lo por outros motivos e, por isso, a Eq. (3-28) tem interesse.

Desde que o método de Kimura Espectral produza resultados satisfatórios para a caracterização de grupos de ondas, o parâmetro  $\kappa$  será útil nessa caracterização, pois permite relacionar os grupos de ondas com a forma do espectro (Vledder, 1992).

Em Battjes e Vledder, 1984, analisam-se as distribuições de  $J$  em registos provenientes do Mar do Norte obtidos em condições de mar severas. Os autores concluem que, tanto a teoria devida a Kimura, 1980, como o parâmetro espectral de grupos de ondas devido a Battjes, 1984, são válidos por comparação com estes dados reais.

Por outro lado, estes autores verificaram que as predições de  $E[J]$  pelo método de Kimura Espectral concordam muito bem com as observações. A predição teórica da distribuição de  $J$  também não se afasta muito da observada. De facto, utilizando os referidos dados do Mar do Norte, 33 registos de 20 minutos cada, obtidos com uma frequência de amostragem de 2 Hz, Battjes e Vledder, 1984, concluem que

- A distribuição de probabilidade e o valor esperado do número de ondas dos grupos de ondas que excedem  $H_s$  previstos pelo método de Kimura Espectral são, respectivamente, bastante aproximados da distribuição das frequências observadas e dos valores médios das amostras;
- A conclusão anterior é válida quer quando se utiliza o coeficiente de correlação entre alturas de onda consecutivas calculado no domínio do tempo, quer utilizando um parâmetro espectral de agrupamento de ondas baseado na teoria da envolvente de Rice, 1954 (esta teoria será apresentada mais à frente, na Secção 3.4.1.1);
- Disto, conclui-se que as características essenciais dos grupos de ondas podem ser explicadas com base na teoria linear de Airy.

Antes de terminar esta secção, como exemplo de aplicação e para comparar com os resultados numéricos da pág. 32, referente à Secção 3.3.1, calcule-se o valor de  $p_{22}$  para  $v = H_s/2$ , ou seja, para  $H_c = H_s$ , supondo, por exemplo, que o coeficiente de correlação entre ondas sucessivas é  $r = 0.95$ .

Para este valor de  $r$  (aliás, elevado), o correspondente valor de  $\kappa$ , dado pela Eq. (3-28) é 0.983.

Ter-se-á, pois,

$$p_{22} = P[H_{k+1} > H_s \mid H_k > H_s] = \frac{\int_{H_s}^{+\infty} \int_{H_s}^{+\infty} f_R(x, y) dx dy}{\exp\left(-\frac{2H_s^2}{H_s^2}\right)} = \frac{0.105543}{0.135} = 0.7817$$

O valor agora obtido, 0.7817, regista uma diferença assinalável relativamente ao valor obtido anteriormente, 0.135. Deste modo,  $E[J]$  é agora de 4.58 ondas, em vez do valor de 1.16 ondas obtido

pela teoria simples dos chorrilhos (o que confirma a afirmação de Vledder, 1983, citada na pág. 32). Para  $E[G]$ , obtém-se o valor de 5.86 ondas, em vez do anterior valor de 8.56 ondas. Isto mostra bem o alcance das modificações introduzidas por Kimura no método inicial dos chorrilhos.

### 3.3.4 PARÂMETROS DIVERSOS NO PONTO DE VISTA DISCRETO

A massa de probabilidade da distribuição de  $J$  já foi obtida anteriormente, Eq. (3-18), juntamente com a sua média e variância. Está-se agora em condições de poder calcular:

- A probabilidade de que um grupo de ondas de nível  $v$  contenha mais de  $n$  ondas, dada por (Benjamin e Cornell, 1970):

$$P[J > n] = 1 - P[J \leq n] = 1 - \sum_{k=1}^n P[J = k] = 1 - \sum_{k=1}^n (1 - p_{22}) p_{22}^{k-1} = p_{22}^n$$

- O número médio de grupos de ondas de nível  $v$ ,  $E[N_G]$ , num registo de duração  $T_R$ . Tem-se,

$$E[N_G] = \frac{T_R}{T_Z E[G]} = \frac{T_R}{T_Z} p_{22} (1 - p_{22}) \quad (3-29)$$

- A probabilidade de que, num registo de duração  $T_R$ , haja  $j$  grupos de ondas de nível  $v$ . Para este efeito, pode admitir-se que o número de ocorrências de grupos de ondas num intervalo  $(t_0, t_0+t)$  de tempo segue a distribuição de *Poisson*. Nesse caso, a probabilidade de que, num registo de duração  $T_R$ , haja  $j$  grupos de ondas de nível  $v$  será:

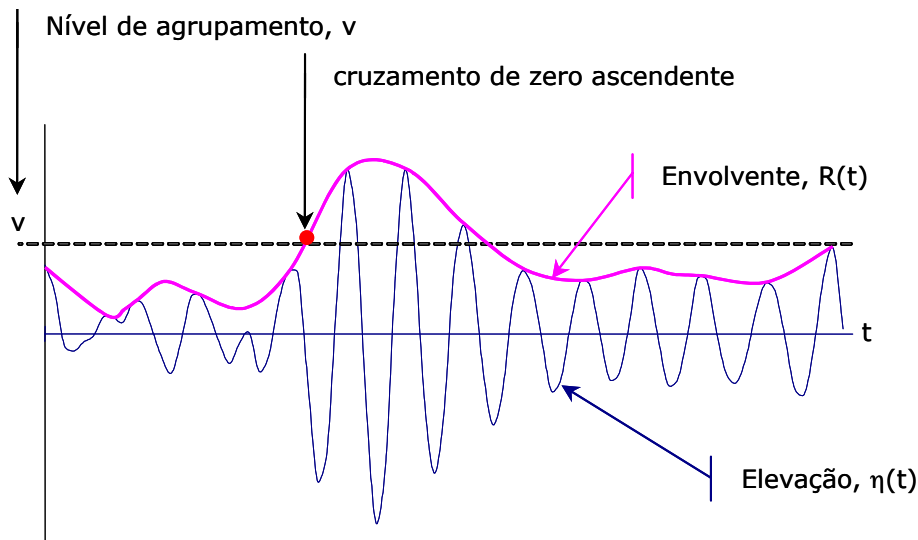
$$P[N_G = j] = \frac{\{T_R E[N_G]\}^j}{j!} \exp\{-T_R E[N_G]\} \quad (3-30)$$

## 3.4 CARACTERIZAÇÃO DE GRUPOS DE ONDAS ATRAVÉS DA ENVOLVENTE

Nesta secção, apresentam-se os métodos de caracterização de grupos de ondas que adoptam a noção de envolvente de um registo. Como se disse atrás, uma definição intuitiva de *envolvente* de uma realização,  $\eta(t)$ , é uma função,  $R(t)$ , cujo gráfico liga as cristas de zero ascendente de  $\eta(t)$ , Fig. 3-2.

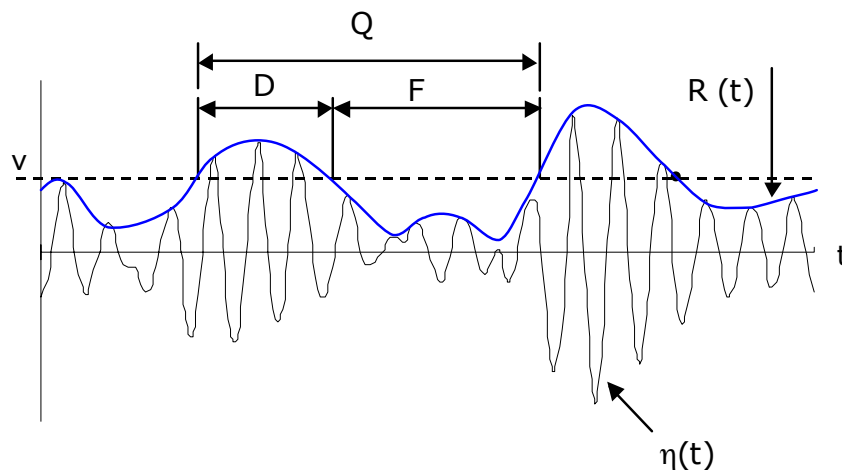
Em termos matemáticos mais rigorosos, entende-se por envolvente de uma realização  $\eta(t)$ , uma função,  $R(t)$ , não negativa, que obedeça aos seguintes requisitos (Cramér e Leadbetter, 1967):

- (1)  $|\eta(t)| < R(t)$  para qualquer  $t$ ;
- (2)  $|\eta(t_i)| = R(t_i)$  para os  $t_i$  correspondentes aos máximos de  $\eta(t)$ ;
- (3)  $R(t)$  varia lentamente ao longo de  $t$ .



**Fig. 3-2 - Sinal  $\eta(t)$  e respectiva envolvente  $R(t)$**

Designar-se-ão por  $D$  e  $Q$  as v.a. contínuas correspondentes às discretas  $J$  e  $G$ , já definidas. Assim,  $D$  é a duração da *excursão superior* da envolvente<sup>5</sup>, como, aliás, se tem já considerado, e  $Q$  é o intervalo de tempo entre cruzamentos ascendentes do nível  $v$  (*excursão total*) por parte da envolvente (Fig. 3-3). Designar-se-á, ainda, por  $F$  a v.a. dada por  $Q - D$ .  $F$  é, portanto, o intervalo de tempo durante o qual a envolvente se mantém abaixo do nível  $v$  (*excursão inferior*), entre dois grupos de ondas.



**Fig. 3-3 - Durações da excursão superior,  $D$ , inferior,  $F$ , e total,  $Q$**

Cramér e Leadbetter, 1967, apresentam alguns resultados sobre as distribuições de  $Q$ ,  $D$  e  $F$ , mas apenas para o caso de o sinal  $\eta(t)$  ser uma realização de um PE normal, estacionário e ergódico, o

<sup>5</sup> Chama-se *excursão superior de nível  $v$*  (*upwards excursion*, Cramér e Leadbetter, 1967) à parte da envolvente acima de certo nível  $v$  de um grupo de ondas.



que certamente não está provado que seja o caso da envolvente. Desconhece-se a existência de avanços sobre este assunto.

Põe-se, assim, o problema de obter teoricamente a distribuição de  $D$ , a duração do grupo de ondas a partir da envolvente, o que não é fácil: das considerações contidas em Cramér e Leadbetter, 1967, pode deduzir-se, a partir da teoria da envolvente (Cramér e Leadbetter, 1967; Carvalho, 1981, 1989), que o valor médio,  $E[D]$ , de  $D$ , é dado por

$$E[D] = \frac{H_s}{4v \sqrt{2\pi \left( \frac{1}{T_z^2} - \bar{f}^2 \right)}} \quad (3-31)$$

sendo os parâmetros  $H_s$ ,  $T_z$  e  $\bar{f}$  calculados pelas Eqs. (2-13), (2-15), e (2-16), respectivamente.

O método de cálculo de  $E[D]$  mediante esta fórmula é designado mais à frente por *método da teoria da envolvente* (ENV).

A teoria da envolvente, apesar de fornecer  $E[D]$ , não permite a determinação da distribuição de  $D$ . Nolte e Hsu, 1972, adoptam para  $D$  a distribuição exponencial, com base em considerações teóricas que consistem em admitir que o número de vezes que a envolvente cruza o nível  $v$ , para cima ou para baixo, no intervalo  $(0, t)$ ,  $N(t)$ , é um processo estocástico (PE) de Poisson.

No caso de se verificarem os axiomas do PE de Poisson (ver **Anexo 3 - Deduções Matemáticas**), resulta para  $D$  a distribuição exponencial, cuja função de distribuição é dada por:

$$F_D(x) = 1 - e^{-\frac{x-d_0}{\bar{D}}} \quad (3-32)$$

em que  $d_0$  é um parâmetro de localização, correspondente ao valor mínimo de  $D$ , e  $\bar{D} = E[D]$ .

Notar que  $E[D]$ , calculado da Eq. (3-31), depende apenas do espectro e, por isso, uma vez aceite um modelo para a distribuição de  $D$  (por exemplo, a referida distribuição exponencial), as características estatísticas do agrupamento de ondas, para todos os registos com dado espectro, dependem só desse espectro.

Este resultado parece confirmar que os grupos de ondas dependem do espectro. Este problema será investigado mais à frente na Secção 3.7.2.

Admitindo a distribuição exponencial para  $D$ , é possível obter fórmulas para certos parâmetros, paralelamente ao que se fez na Secção 3.3.4, para o caso discreto. Essas fórmulas são apresentadas na Secção 3.4.4.

Nolte e Hsu, 1972, afirmam que a concordância dos dados observados de valores de  $D$  com o modelo exponencial é excelente. No entanto, pelo menos o primeiro axioma suscita dúvidas, no caso em apreço. Isto leva a duvidar da base teórica para a hipótese de exponencialidade admitida pelos autores citados. Na Secção 3.6.2, faz-se um teste visual deste modelo, com os dados disponíveis.

Voltando ao ponto de vista discreto, é possível, a partir da noção de envolvente, obter, para os valores médios de  $J$  e  $G$ , além das fórmulas de  $E[J]$  e  $E[G]$  (Eqs. (3-19) e (3-22), respectivamente), também as seguintes fórmulas aproximadas, adaptadas de Longuet-Higgins, 1984, e Medina e Hudspeth, 1990 (Ver **Anexo 3 - Deduções Matemáticas**),

$$E[J] \approx \frac{1}{v} \sqrt{\frac{m_0(4\pi^2 + 1 - \kappa^2)}{2\pi(1 - \kappa^2)}} \quad (3-33)$$

$$E[G] \approx E[J] \exp\left(\frac{v^2}{2m_0}\right) \quad (3-34)$$

sendo:

- $v$  - o nível do grupo de ondas;
- $m_0$  - o momento de ordem zero, Eq. (2-12);
- $\kappa$  - o parâmetro de Battjes, 1974, Eq. (3-26).

Neste trabalho, as Eqs. (3-33) e (3-34) são designadas por *fórmulas de Longuet-Higgins* (LH).

Por outro lado, a partir de  $E[G]$ , calculado de acordo com a Eq. (3-34), pode obter-se o valor médio do número de grupos de ondas de nível  $v$ ,  $E[N_G]$ , num registo de duração  $T_R$ . Realmente, tendo em conta que  $T_Z E[G]$  é o número médio de ondas do chorrilho total, vem

$$E[N_G] = \frac{T_R}{T_Z E[G]} = \frac{T_R}{T_Z E[J] \exp\left(\frac{v^2}{2m_0}\right)} = \frac{T_R}{T_Z E[J]} \exp\left(-\frac{v^2}{2m_0}\right) = \frac{T_R}{D} \exp\left(-\frac{v^2}{2m_0}\right) \quad (3-35)$$

fórmula equivalente, com elementos contínuos, à Eq. (3-29).

### 3.4.1 CÁLCULO DA ENVOLVENTE

Nesta secção apresentam-se duas formas de cálculo da envolvente de um registo, designadas neste trabalho por *envolvente de Rice* e *envolvente de Hilbert*, que, como se verá mais à frente, produzem resultados idênticos.

#### 3.4.1.1 A ENVOLVENTE DE RICE

De acordo com Rice, 1954, ou Carvalho, 1980, a envolvente,  $R(t)$ , designada neste trabalho por *envolvente de Rice*, pode ser calculada com base num registo das elevações da superfície da água,  $\eta(t)$ , da seguinte forma:

$$R(t) = \sqrt{A^2(t) + B^2(t)} \quad (3-36)$$

em que, para o cálculo de  $A(t)$  e  $B(t)$ , é necessário conhecer a *frequência dominante*,  $f_d$ , de  $\eta(t)$ , isto é, a frequência à qual se admite estarem associadas as maiores amplitudes, por exemplo.

$A(t)$  e  $B(t)$  são dados por

$$A(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2S(f_k)\Delta f} \cos[2\pi f_k t + \phi_k - 2\pi f_d t] \quad (3-37)$$

$$B(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2S(f_k)\Delta f} \sin[2\pi f_k t + \phi_k - 2\pi f_d t] \quad (3-38)$$

sendo:

- $f_d$  - a frequência dominante de  $\eta(t)$ ;
- $N$  - o número de sinusóides consideradas na definição do espectro;
- $f_k$  - a frequência para cada sinusóide  $k$ ;
- $\phi_k$  - a fase da sinusóide correspondente à frequência da sinusóide  $k$ , tomando valores independentes uns dos outros de uma variável aleatória uniformemente distribuída entre  $0$  e  $2\pi$ ;
- $S(f)$  - o espectro unilateral de  $\eta(t)$ .

Pode escrever-se a elevação da superfície da água,  $\eta(t)$ , da seguinte forma:

$$\eta(t) = R(t) \cos [2\pi f_d t + \varphi(t)] \quad (3-39)$$

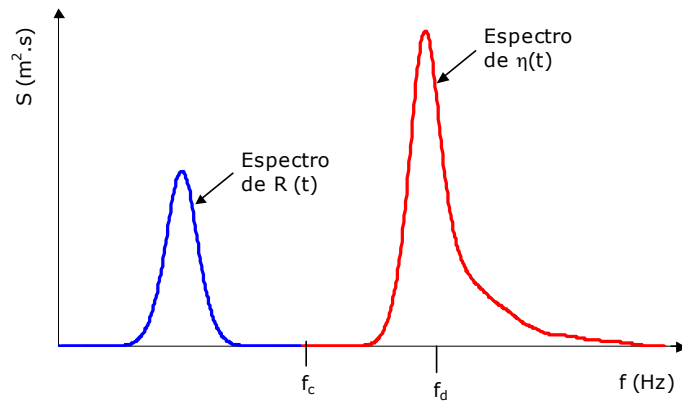
sendo  $R(t)$  calculado da Eq. (3-36) e as fases,  $\varphi(t)$ , calculadas de

$$\varphi(t) = \arctan \frac{B(t)}{A(t)} \quad (3-40)$$

Para que  $R(t)$  varie lentamente ao longo do tempo (uma das condições para ser envolvente), é preciso que o seu espectro seja nulo acima de uma certa frequência de corte,  $f_c$ , tal que:  $f_c \ll f_d$  (Papoulis, 1965).

Isto significa evidentemente que as frequências presentes em  $R(t)$  são muito menores (os períodos muito maiores) que as frequências presentes em  $\eta(t)$ , Fig. 3-4.

Verificar-se-á que  $R(t)$  é envolvente, ou seja, que obedece aos requisitos iniciais, depois de se introduzir a envolvente de Hilbert na próxima secção.



**Fig. 3-4 - Espectros de  $R(t)$  e  $\eta(t)$**

### 3.4.1.2 A ENVOLVENTE DE HILBERT

Esta forma de definir a envolvente tem a vantagem de não exigir a especificação prévia da frequência dominante  $f_d$ , mas apenas o cálculo da transformada de Hilbert (TH)<sup>6</sup> de  $\eta(t)$ . Segundo esta definição, a envolvente, aqui designada por *envolvente de Hilbert* é dada simplesmente por (Cramér e Leadbetter, 1967):

$$R(t) = \sqrt{\eta^2(t) + \hat{\eta}^2(t)} \quad (3-41)$$

com

$$\hat{\eta}(t) = TH[\eta(t)] \quad (3-42)$$

### 3.4.1.3 A ENVOLVENTE DE RICE/HILBERT

Verifica-se que, para o sinal  $\eta(t)$ , qualquer que seja  $f_d$ , se tem (Capitão e Carvalho, 1997a),

$$R(t) = \sqrt{\eta^2(t) + \hat{\eta}^2(t)} = \sqrt{A^2(t) + B^2(t)} \quad (3-43)$$

sendo  $A(t)$  e  $B(t)$  as funções consideradas anteriormente, Eqs. (3-37) e (3-38).

Esta igualdade entre as duas definições da envolvente  $R(t)$  apresentadas em 3.4.1.1 e 3.4.1.2 justifica que aquela passe a ser designada por *envolvente de Rice/Hilbert* (RH). Neste trabalho, o cálculo da envolvente RH será efectuado unicamente mediante a definição da Eq. (3-41).

Note-se que  $R(t)$  tem distribuição de Rayleigh. De facto, atendendo a que

$$E[\eta(t)] = E[\hat{\eta}(t)] = 0 \quad (3-44)$$

<sup>6</sup> Ver definição de TH no **Anexo 1 - Ferramentas Matemáticas**.

e que

$$\text{var}[\eta(t)] = \text{var}[\hat{\eta}(t)] = m_0 \quad (3-45)$$

conclui-se (Papoulis, 1965) que a função de distribuição de  $R(t)$  é dada por

$$F_R(r) = 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2m_0}\right) \quad (3-46)$$

Finalmente, tenha-se em atenção que há outros métodos de calcular funções que obedecem ao critério de envolvente. Essas funções poderão ser diferentes da função  $R(t)$  obtida pela Eq. (3-43). Entre esses métodos estão o método EIA e o método REIA, tratados em 3.4.2 e 3.4.3, respectivamente.

### 3.4.2 MÉTODO EIA

Neste método, apresentado originalmente em Funke e Mansard, 1979, usa-se uma curva que, para efeitos de caracterização de grupos de ondas, desempenha o papel de envolvente. Esta curva, designada em inglês por SIWEH (*Smoothed Instantaneous Wave Energy History*) ou, em português, EIA (*Energia Instantânea Alisada*), é dada por:

$$E(t) = \frac{1}{2T_p} \int_{-T_p}^{T_p} \eta^2(t+\tau)Q(\tau)d\tau \quad (3-47)$$

sendo  $T_p$  o período de pico do espectro do registo das elevações da superfície  $\eta(t)$  e  $Q(\tau)$  uma *janela temporal* triangular de *alisamento* de largura  $2T_p$ . Note-se que  $T_p = 1/f_p$ , sendo  $f_p$  a frequência de pico. O alisamento (*smoothing*) possibilita a obtenção de uma função mais suave, com menos oscilações.

O principal parâmetro proposto por Funke e Mansard, 1979, é o chamado *factor de agrupamento*,  $GF$  (*groupiness factor*), assim definido:

$$GF = \frac{\sqrt{m'_0}}{m_0} \quad (3-48)$$

sendo:

$m'_0$  - o momento de ordem zero do espectro de  $E(t)$ ;

$m_0$  - o momento de ordem zero do espectro de  $\eta(t)$ .

De acordo com Funke e Mansard, 1979,  $GF$  tem o seguinte significado: quanto maior é o valor de  $GF$  de um registo, mais pronunciados são os grupos de ondas desse registo, estando os valores mais comuns de  $GF$  situados entre 0.2 e 1.5.

Ora, Collins, 1990, demonstra que  $GF$  tem de ser o mesmo para todas as realizações que tenham o mesmo espectro. Também, anteriormente, Medina e Hudspeth, 1987, e Hudspeth e Medina, 1988, tinham mostrado que o factor  $GF$  é constante, e igual a 1, para realizações de processos estocásticos gaussianos, os quais estão na base de toda a teoria estatística da agitação marítima. Por isso, para estes processos, "o factor  $GF$  é incapaz de identificar as características do agrupamento de ondas" (Medina e Hudspeth, 1987). A variação de valores de  $GF$  que se observa em cálculos feitos com diferentes registos é devida, segundo estes autores, ou às janelas  $Q(\tau)$  usadas, ou a efeitos não-lineares.

Assim sendo, parece ser de rejeitar este parâmetro. No entanto, o método de cálculo da EIA pode ser totalmente aproveitado para o método REIA proposto neste trabalho, a seguir.

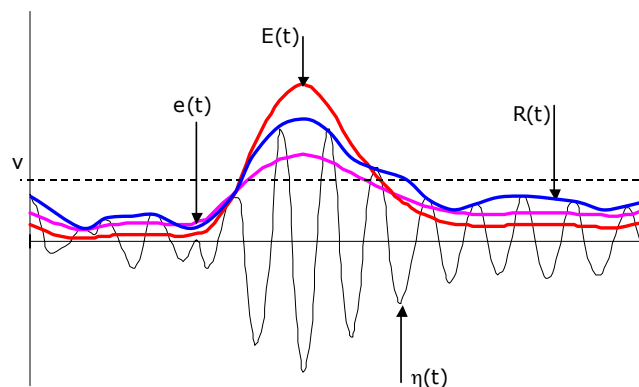
### 3.4.3 MÉTODO REIA

Apesar da referida incorrecção do parâmetro  $GF$ , pensou-se que talvez a função EIA/SIWEH,  $E(t)$ , pudesse ser aproveitada como aproximação adequada da envolvente, sendo assim uma alternativa ao método de Rice-Hilbert, que produz a função  $R(t)$ . Notar, porém, que  $E(t)$  tem as dimensões  $L^2$ , e tanto  $R(t)$  como  $\eta(t)$  têm as dimensões  $L$ , não fazendo, por isso, sentido compará-las. Há casos em que  $E(t)$  é uma razoável aproximação da envolvente e outros em que os seus valores são muito diferentes dos das cristas de  $\eta(t)$ . Por esta razão, Hudspeth e Medina, 1988, fazem uma comparação visual entre  $E(t)$  e  $R^2(t)$ .

Neste trabalho, julgou-se preferível introduzir uma nova função, dada por

$$e(t) = \sqrt{E(t)} \quad (3-49)$$

designada por *Raiz quadrada da Energia Instantânea Alisada* (REIA), em que a largura,  $T_p$ , proposta por Funke e Mansard para a função SIWEH, poderia eventualmente ser modificada. Esta função tem a vantagem de ter as mesmas dimensões de  $\eta(t)$  e já se pode considerar uma aproximação alternativa da envolvente de  $\eta(t)$ , Fig. 3-5.



**Fig. 3-5 - Comparação das envolventes  $R(t)$ ,  $E(t)$  e  $e(t)$**

Como se verá na Secção 3.7, verifica-se que a função envolvente definida pela Eq. (3-49), daqui para a frente designada por *envolvente REIA* (REIA), assinala bastante bem os grupos de ondas. Contudo, visto que é uma função muito suave, não se mostra eficiente no cálculo dos parâmetros  $E[J]$  e  $E[G]$ , principalmente para níveis de grupo  $v$  elevados.

#### 3.4.4 PARÂMETROS DIVERSOS NO PONTO DE VISTA CONTÍNUO

Analogamente ao que foi feito sob o ponto de vista discreto (Secção 3.3.4), determinam-se também nesta secção diversos parâmetros de interesse, desta vez sob um ponto de vista contínuo. Assim, se se continuar a admitir a distribuição exponencial, dada pela Eq. (3-32), para a v.a.  $D$ , duração dos grupos de ondas, e fazendo  $d_0 = 0$ , para simplificar, obtém-se a seguinte distribuição:

$$F_D(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\bar{D}}} \quad (3-50)$$

em que a duração média,  $\bar{D}$ , é dada por qualquer das fórmulas já indicadas, Eqs. (3-1) ou (3-31).

Deste modo, podem, do ponto de vista contínuo, calcular-se os seguintes parâmetros:

- A probabilidade de que um grupo de ondas de nível  $v$  contenha mais de  $n$  ondas,

$$P[J > n] = P[D > nT_z] = 1 - F_D(nT_z) = e^{-\frac{nT_z}{\bar{D}}}$$

- O número médio de grupos de ondas de nível  $v$ ,  $E[N_G]$ , num registo de duração  $T_R$ ,

$$E[N_G] = T_R N_z$$

em que  $N_z$  é o número de cruzamentos ascendentes do nível  $v$  da envolvente, por unidade de tempo. Ora,

$$\bar{D} = \frac{\text{Tempo total da envolvente acima de } v \text{ no tempo } T_R}{\text{Nº médio de ocorrências de grupos de ondas no tempo } T_R} = \frac{T_R P[R(t) > v]}{T_R N_z}$$

Logo,

$$E[N_G] = T_R N_z = \frac{T_R P[R(t) > v]}{\bar{D}} = \frac{T_R \exp\left(-\frac{v^2}{2m_0}\right)}{\bar{D}} = \frac{T_R \exp\left(-\frac{v^2}{2m_0}\right)}{E[J]T_z} \quad (3-51)$$

dado que, como se viu,  $R(t)$  tem a função de distribuição de Rayleigh, dada pela Eq. (3-46). Notar que a Eq. (3-51) é igual à Eq. (3-35), atrás definida por outra via.

- A probabilidade de que, num registo de duração  $T_R$ , haja  $j$  grupos de ondas de nível  $v$

$$P[N_G = j] = \frac{\{T_R E[N_G]\}^j}{j!} \exp\{-T_R E[N_G]\} \quad (3-52)$$

### 3.5 OUTROS MÉTODOS

Masson e Chandler, 1993, analisaram e compararam dois métodos de caracterização de grupos de ondas por via espectral. O primeiro consiste no método da envolvente corrigido através de um esquema de contagem no plano temporal da autoria de Longuet-Higgins, 1984 – “*discrete counting correction scheme*”. Deste primeiro método, na sua globalidade, Masson e Chandler, 1993, dizem que o esquema utilizado emprega uma distribuição de probabilidades dos grupos de ondas incorrecta e que é desprezado indevidamente um *efeito de separação (splitting effect)*. Sobre o segundo método, os autores referem que este considera um coeficiente de correlação espectral sistematicamente inferior ao equivalente coeficiente de correlação determinado por via temporal. A subestimação do número médio de ondas dos grupos pode atingir até 12%.

Através de uma abordagem distinta, Haller e Dalrymple, 1995, propuseram também dois parâmetros de avaliação do agrupamento de ondas: a *declividade temporal de grupo (temporal group steepness)*,  $\delta_t$ , isto é, calculada ao longo do tempo num certo local, e a *declividade espacial de grupo (spatial group steepness)*,  $\delta_x$ , calculada numa determinada direcção para um dado instante do tempo. Estes dois parâmetros dão informação sobre a variação de amplitude das ondas e o número de ondas dos grupos. Consideraram que os novos parâmetros “respondem” a mudanças no campo de ondas, devidas quer à aproximação de fundos baixos, quer à rebentação. Os novos parâmetros foram então aplicados a registos reais por forma a estudar a variabilidade do agrupamento de ondas, tanto espacialmente, como temporalmente. Estes autores verificaram que os agrupamentos de ondas persistem na *zona de rebentação*. Por outro lado, verificaram também que a declividade dos grupos está relacionada com o aumento das correntes.

### 3.6 DISTRIBUIÇÃO DA DURAÇÃO DOS GRUPOS DE ONDAS

Como se disse atrás, Nolte e Hsu, 1972, adoptam para a v.a.  $D$  a distribuição exponencial. Com este modelo, estes autores consideram que existe uma concordância excelente entre os dados observados de valores de  $D$  e o modelo exponencial. Admitindo, assim, a distribuição exponencial para  $D$ , viu-se na Secção 3.4.4 como obter fórmulas para certos parâmetros. Nesta secção, elaborou-se um pouco mais este assunto da distribuição dos grupos de ondas através de um conjunto de ensaios numéricos.

#### 3.6.1 CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

Estando definido o nível de agrupamento,  $v$ , a *duração do grupo de ondas de nível  $v$*  pode, como se referiu na Secção 3.2, ser definida como o número de ondas,  $J$ , contido numa sucessão de ondas cujas cristas estão acima de  $v$  (*ponto de vista discreto*) ou como o intervalo de tempo,  $D$ , durante o qual as cristas das ondas se mantêm acima de  $v$  (*ponto de vista contínuo*). A relação entre a perspectiva discreta e a perspectiva contínua é dada pela Eq. (3-1).



No que respeita ao ponto de vista discreto, considera-se o seguinte:

- Quanto à distribuição de  $J$ , existe a solução de Kimura, 1980, Eq. (3-18), com  $E[J]$  e  $var[J]$  dados pelas Eqs. (3-19) e (3-20). Trata-se da distribuição geométrica.
- Poderá também ter interesse considerar a distribuição de  $G$ , o número de ondas do chorri-lho total, isto é, o número de ondas existente entre os começos de dois grupos sucessivos de ondas. Ter-se-á, então, de acordo com a teoria de Kimura, 1980, exposta em 3.3.2:

$$P[G = n] = \frac{p_{22}(1-p_{22})}{1-2p_{22}} \left[ (1-p_{22})^{n-1} - p_{22}^{n-1} \right] \quad (3-53)$$

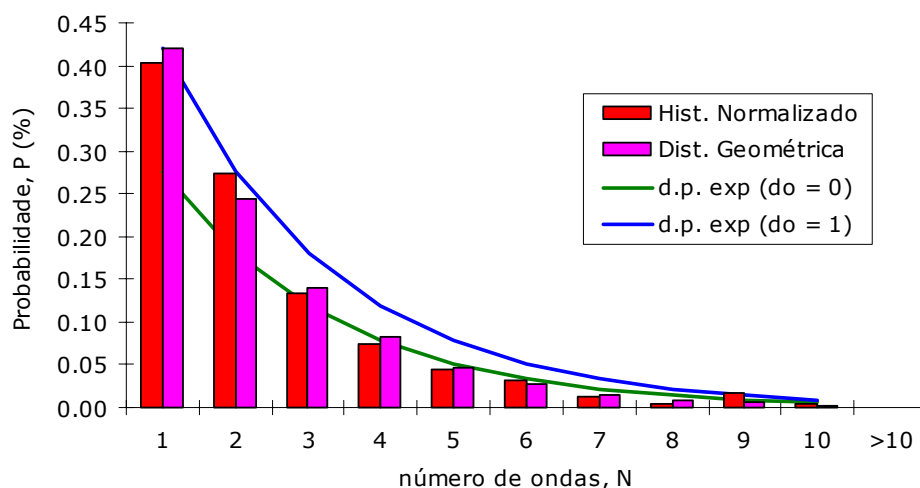
$$E[G] = \frac{1}{p_{22}(1-p_{22})} \quad (3-54)$$

Esta distribuição não tem designação especial.

Quanto ao ponto de vista contínuo, como se disse na Secção 3.4, tem sido defendida para  $D$  a distribuição exponencial. As dúvidas suscitadas levaram a fazer, na secção seguinte, um teste visual deste modelo, com registos simulados numericamente.

### 3.6.2 ESTUDO EMPÍRICO DAS DURAÇÕES DOS GRUPOS DE ONDAS

Para um primeiro estudo empírico da distribuição das durações dos grupos de ondas, considerou-se um registo muito longo, de duração  $T_R = 12\ 000\ s$  (3 h 20 m), simulado numericamente. Para o nível  $v = H_S/3$ , identificaram-se, através da utilização do *método directo* (definição em 3.2), 245 grupos de ondas com durações compreendidas entre 1 e 10 ondas. A Fig. 3-6 mostra o histograma normalizado, designado por "Hist. Normalizado" (escalado de modo a que totalize 1.0).



**Fig. 3-6 - Distribuição empírica das durações de grupos de ondas para  $v = H_S/3$**

A este histograma adaptaram-se as duas distribuições mencionadas anteriormente, a distribuição geométrica (caso discreto), Eq. (3-18), e a distribuição exponencial (caso contínuo), Eq. (3-56).

Para a distribuição geométrica,  $p_{22}$  é calculado a partir do método de Kimura Espectral, Eq. (3-23), ou, eventualmente, pelo *método directo*, a partir do valor médio de  $J$ , pela seguinte fórmula:

$$p_{22} = 1 - 1/E[J] = 1 - \frac{\text{n}^\circ \text{ total de grupos de onda}}{\sum_i n_i} \quad (3-55)$$

e em que  $n_i$  é o número de ondas do grupo de ondas número  $i$ . Os valores de  $P[J = n]$  aparecem designados por "Dist. Geométrica", na Fig. 3-6.

A distribuição exponencial é a aplicada ao ponto de vista contínuo (v.a.  $D$ ), com densidade de probabilidade

$$f_D(x) = \frac{1}{D} \exp\left(-\frac{x-d_0}{D}\right) \quad (3-56)$$

em que  $d_0$  é um parâmetro de localização, correspondente ao menor valor observado de  $D$ , e se obteve o valor médio da duração dos grupos de ondas,  $E[D] = \bar{D}$ , por aplicação da Eq. (3-1), fórmula que relaciona  $E[J]$  com  $E[D]$ .

Na Fig. 3-6 estão representadas as distribuições de probabilidade (d.p.) exponencial para os casos  $d_0 = 0$ , "d.p. exp ( $d_0 = 0$ )", e  $d_0 = 1$ , "d.p. exp ( $d_0 = 1$ )".

No ponto de vista discreto, verifica-se que há uma boa adaptação da distribuição geométrica aos valores experimentais. Igualmente, para o ponto de vista contínuo, há uma boa adaptação da distribuição exponencial, sensivelmente melhor para  $d_0 = 1$ .

Aliás, como se compreende, a transformação de discreto em contínuo pela fórmula anterior não é significativa, dado que se trata apenas de multiplicação por uma constante, e, por outro lado, sabe-se que a distribuição exponencial é a versão contínua da distribuição geométrica (Benjamin e Cornell, 1970).

Em face do exposto, pode perguntar-se se, para o estudo dos grupos de ondas, valerá a pena ir além do ponto de vista discreto, uma vez que o modelo geométrico, com o parâmetro  $p_{22}$  obtido pelo método de Kimura Espectral ou pelo método directo, é tão satisfatório. A resposta afigura-se negativa por enquanto, pelo menos para estudos elementares práticos. De qualquer forma, pode concluir-se que estes resultados vão no sentido dos apresentados por Nolte e Hsu, 1972.

### 3.7 CÁLCULOS NUMÉRICOS E RELAÇÕES ENTRE OS MÉTODOS

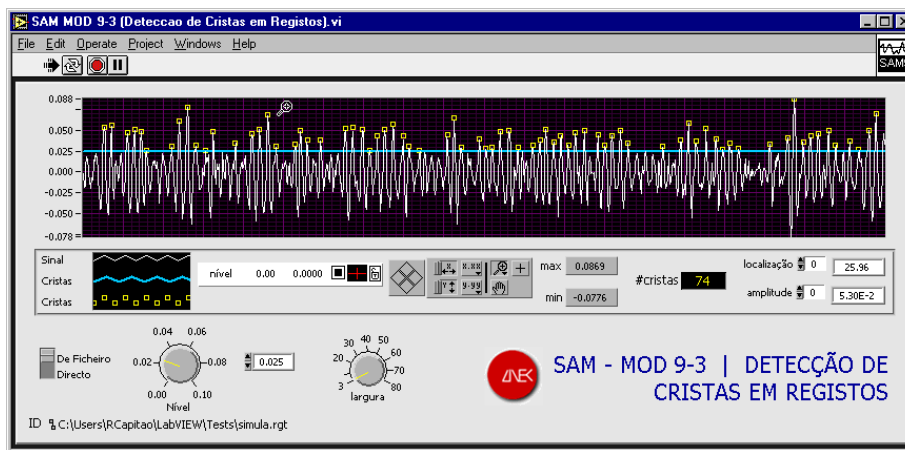
Nesta secção, são comparados os métodos de caracterização de grupos de ondas atrás enunciados, através da análise de vários registos, quer simulados em canal de ondas irregulares, quer simulados numericamente, a partir de um certo espectro empírico.

As relações entre os métodos são estabelecidas a partir da análise dos resultados que produzem, especialmente quanto aos parâmetros  $E[J]$ ,  $E[G]$  e  $E[N_G]$ , definidos nas secções anteriores. Os resultados de referência, isto é, aqueles que serão tomados como mais correctos, são, como se disse, os obtidos pelo *método directo*, ou seja, pelo cálculo directo dos valores a partir dos registos.

Os cálculos apresentados foram obtidos através da utilização do programa **AGRUPA**<sup>7</sup>, agora integrado no pacote de *software* **SAM** com o nome **SAM MOD 9-4 (Caracterização de Grupos de Onda)**. O módulo **SAM MOD 9-3 (Detecção de Cristas em Registos)**, do mesmo pacote, fornece também resultados de interesse para a caracterização de grupos de onda. Pode ver-se nas Figs. 3-7 e 3-8 um exemplo de aplicação destes dois módulos.



**Fig. 3-7 - Exemplo de aplicação do programa SAM MOD 9-4 (Caracterização de Grupos de Onda)**



**Fig. 3-8 - Exemplo de aplicação do programa SAM MOD 9-3 (Detecção de Cristas em Registos)**

<sup>7</sup> Este programa foi inicialmente escrito em código Turbo Pascal 6.0, mas mais tarde foi convertido em linguagem gráfica "G" – ver **Capítulo 6 - Software de Simulação Numérica e Física**, fazendo agora parte do pacote de *software* **SAM**, descrito no **Anexo 6 - Lista de Módulos e Rotinas SAM**.

3.7.1 VALOR MÉDIO DO NÚMERO DE ONDAS DOS GRUPOS DE ONDAS –  $E[J]$

Para a caracterização do parâmetro  $E[J]$ , foram considerados vários registos simulados numericamente com os espectros de JONSWAP, Pierson-Moskowitz generalizado e Pierson-Moskowitz ITTC de diferentes parâmetros (Ver **Anexo 2 - Definição de Espectros Empíricos** para uma descrição destes espectros empíricos). Igualmente, foram considerados 5 registos reais, obtidos no canal de ondas irregulares do LNEC.

No Quadro 3-1 podem ser observadas as características principais dos registos analisados, em que  $H_S$  (m),  $T_p$  (s),  $N$ ,  $T_R$  (s) e  $T_Z$  (s), são, respectivamente, a altura significativa, o período de pico do espectro, o número de pontos, a duração total e o período médio correspondentes a cada registo.

**Quadro 3-1 - Características pretendidas e obtidas dos registos analisados**

| Registo | Características gerais e pretendidas |          |               |            |              |      |           | Características obtidas |              |           |
|---------|--------------------------------------|----------|---------------|------------|--------------|------|-----------|-------------------------|--------------|-----------|
| Nº      | Nome                                 | Origem   | Tipo espectro | $H_S$ (m)  | $T_p$ (s)    | N    | $T_R$ (s) | $H_S$ (m)               | $T_p$ (s)    | $T_Z$ (s) |
|         | BU820                                | canal    | JONSWAP       | -          | -            | 1500 | 2121      | <b>4.4</b>              | <b>8.55</b>  | 8.38      |
|         | BU830                                |          |               | -          | -            | 1500 | 2121      | <b>6.3</b>              | <b>8.55</b>  | 8.23      |
|         | QU1020                               |          |               | -          | -            | 1500 | 2121      | <b>4.3</b>              | <b>8.73</b>  | 8.70      |
| 4       | PV1230                               |          |               | -          | -            | 1500 | 2255      | <b>6.5</b>              | <b>11.81</b> | 11.30     |
| 5       | PV1620                               |          |               | -          | -            | 1500 | 2255      | <b>5.6</b>              | <b>14.64</b> | 13.93     |
| 6       | SIM820                               | numérico | JONSWAP       | <b>4.4</b> | <b>8.55</b>  | 1400 | 2100      | 4.3                     | 8.54         | 7.36      |
| 7       | SIM830                               |          |               | <b>6.3</b> | <b>8.55</b>  | 1400 | 2100      | 6.1                     | 8.47         | 7.40      |
| 8       | SIM1020                              |          |               | <b>4.3</b> | <b>8.73</b>  | 1400 | 2100      | 4.2                     | 8.46         | 7.46      |
| 9       | SIM1230                              |          |               | <b>6.5</b> | <b>11.81</b> | 1400 | 2100      | 6.3                     | 11.73        | 9.62      |
| 10      | SIM1620                              |          |               | <b>5.6</b> | <b>14.64</b> | 1400 | 2100      | 5.5                     | 14.48        | 11.69     |
| 11      | SIMJON1                              |          | JONSWAP       | 4          | 10           | 1200 | 1200      | 4.0                     | 9.84         | 8.44      |
| 12      | SIMJON2                              |          |               |            |              | 1200 | 1200      | 4.0                     | 9.84         | 8.34      |
| 13      | SIMJON3                              |          |               | 8          | 12           | 1200 | 1200      | 3.8                     | 11.76        | 9.69      |
| 14      | SIMJON4                              |          |               |            |              | 1200 | 1200      | 7.9                     | 12.00        | 9.79      |
| 15      | SIMPMI1                              |          | P-M (ITTC)    | 4          | -            | 1200 | 1200      | 4.1                     | 10.53        | 7.98      |
| 16      | SIMPMI2                              | 1200     |               |            |              | 1200 | 3.9       | 9.60                    | 7.84         |           |
| 17      | SIMPMG1                              | P-M GEN  | 4             | 10         | 1200         | 1200 | 3.9       | 9.84                    | 7.84         |           |
| 18      | SIMPMG2                              |          |               |            | 1200         | 1200 | 4.0       | 10.34                   | 7.89         |           |
| 19      | SIMPMG3                              |          | 4             | 12         | 1200         | 1200 | 3.9       | 12.24                   | 9.07         |           |
| 20      | SIMPMG4                              |          |               |            | 1200         | 1200 | 7.9       | 11.65                   | 9.21         |           |

Os resultados numéricos referentes aos diversos casos estudados podem ser consultados nos Quadros 3-2 a 3-5, nas págs. 54 a 57. Nestes quadros, observam-se os valores de  $E[J]$ , estimados por diferentes métodos, descritos mais à frente.

Mesmo para os casos em que se utiliza no cálculo o ponto de vista contínuo, os resultados são convertidos para o ponto de vista discreto, para efeitos de comparação. Assim, por exemplo, obtido  $E[D]$ , transforma-se em  $E[J]$ , mediante a Eq. (3-1).

Embora haja outras formas de calcular  $E[G]$ , na sua avaliação utilizou-se a Eq. (3-34), das fórmulas de Longuet-Higgins (LH), independentemente do método de cálculo de  $E[J]$ . Como se sabe, o parâmetro  $E[G]$  é importante para o cálculo de  $E[N_G]$ , valor médio do número de grupos de ondas de nível  $v$  num registo de duração  $T_R$ .

Estes três parâmetros,  $E[J]$ ,  $E[G]$  e  $E[N_G]$ , são importantes como caracterizadores dos grupos de ondas de um registo. Para efeitos de comparação das características de registos de duração diferente, considerou-se, para o cálculo de  $E[N_G]$ ,  $T_R = 1200$  s (20 minutos).

As siglas utilizadas no texto e nos Quadros 3-2 a 3-5, e as correspondentes descrições dos diferentes métodos de estimação de  $E[J]$ , são as seguintes:

- RH envolvente Rice/Hilbert** - Consiste em calcular a envolvente através da Eq. (3-43), determinar os cruzamentos desta com o(s) nível(is)  $v$ , obter a partir destes a amostra dos valores das diferentes durações das excursões superiores, determinar a sua média aritmética e, finalmente, dividir por  $T_Z$ , para obter a estimativa de  $E[J]$ .
- RHa envolvente Rice/Hilbert alisada** - Trata-se da envolvente anterior, Eq. (3-43), alisada através de médias móveis e da utilização de uma janela temporal, a fim de evitar pequenas oscilações da envolvente que introduzem durações de grupos de ondas espúrias. Nestes cálculos, considera-se o uso de uma janela de Bartlett (triangular) de largura  $T_p/2$ , em que  $T_p$  é o período de pico do espectro. O alisamento (*smoothing*) neste método e no método REIA, abaixo, tem por objectivo obter uma envolvente mais suave, com menos oscilações.
- ENV teoria da ENVolvente** - Utiliza a Eq. (3-31), obtida de modo exacto a partir da teoria da envolvente de Rice/Hilbert. Por isso, é independente dos métodos numéricos que se usem para o cálculo da TF, TH e envolvente. Na realidade, não é necessário o cálculo de qualquer função envolvente.
- REIA envolvente da Raiz quadrada da Energia Instantânea Alisada** - Os procedimentos de cálculo de  $E[J]$  são semelhantes aos do método **RHa**, mas usa-se a função envolvente do método REIA, dada por (3-49). Este método de cálculo da envolvente não envolve estimação de TF ou TH. Para o alisamento, usa-se uma janela temporal de Bartlett de largura  $T_p$ , conforme recomendado por Funke e Mansard, 1979.
- LH fórmula de Longuet-Higgins** - Trata-se da fórmula aproximada, Eq. (3-33), que foi obtida a partir da teoria da envolvente clássica.

**Quadro 3-2 - Resultados da caracterização de grupos de ondas - registos 1 a 5**

| Características                    | Identificação do registo |      |      |              |      |      |               |      |      |               |      |      |               |      |      |
|------------------------------------|--------------------------|------|------|--------------|------|------|---------------|------|------|---------------|------|------|---------------|------|------|
| Gerais do registo                  | 1                        |      |      | 2            |      |      | 3             |      |      | 4             |      |      | 5             |      |      |
| Nome do ficheiro                   | <b>BU820</b>             |      |      | <b>BU830</b> |      |      | <b>QU1020</b> |      |      | <b>PV1230</b> |      |      | <b>PV1620</b> |      |      |
| Origem                             | <b>Canal</b>             |      |      | <b>Canal</b> |      |      | <b>Canal</b>  |      |      | <b>Canal</b>  |      |      | <b>Canal</b>  |      |      |
| Forma do espectro                  | JONSWAP                  |      |      | JONSWAP      |      |      | JONSWAP       |      |      | JONSWAP       |      |      | JONSWAP       |      |      |
| Escala: espaço e tempo             | 50 e 7.1                 |      |      | 50 e 7.1     |      |      | 50 e 7.1      |      |      | 56.5 e 7.5    |      |      | 56.5 e 7.5    |      |      |
| Cte. multiplicativa, $k_s$         | 0.000254                 |      |      | 0.000254     |      |      | 0.000254      |      |      | 0.00024       |      |      | 0.00024       |      |      |
| No. de pontos, N                   | 1500                     |      |      | 1500         |      |      | 1500          |      |      | 1500          |      |      | 1500          |      |      |
| Frequência, $f_d$ (Hz)             | 0.71                     |      |      | 0.71         |      |      | 0.71          |      |      | 0.67          |      |      | 0.67          |      |      |
| Duração total, $T_R$ (s)           | 2121                     |      |      | 2121         |      |      | 2121          |      |      | 2255          |      |      | 2255          |      |      |
| Gerais do espectro                 |                          |      |      |              |      |      |               |      |      |               |      |      |               |      |      |
| Freq. média, $f_{med}$ (Hz)        | 0.12                     |      |      | 0.12         |      |      | 0.11          |      |      | 0.09          |      |      | 0.07          |      |      |
| Altura sign., $H_s$ (m)            | 4.4                      |      |      | 6.30         |      |      | 4.3           |      |      | 6.5           |      |      | 5.6           |      |      |
| Período de pico, $T_p$ (s)         | 8.55                     |      |      | 8.55         |      |      | 8.73          |      |      | 11.8          |      |      | 14.6          |      |      |
| Período médio, $T_z$ (s)           | 8.38                     |      |      | 8.23         |      |      | 8.70          |      |      | 11.30         |      |      | 13.93         |      |      |
| Parâmetros espectrais              |                          |      |      |              |      |      |               |      |      |               |      |      |               |      |      |
| $Q_p$ (Goda)                       | 5.264                    |      |      | 5.030        |      |      | 5.532         |      |      | 4.366         |      |      | 4.240         |      |      |
| $Q_e$ (Medina & Hudspeth)          | 5.298                    |      |      | 5.128        |      |      | 5.526         |      |      | 4.431         |      |      | 4.336         |      |      |
| $\nu$ (Longuet-Higgins)            | 0.156                    |      |      | 0.187        |      |      | 0.142         |      |      | 0.235         |      |      | 0.244         |      |      |
| $\kappa$ (Battjes)                 | 0.808                    |      |      | 0.793        |      |      | 0.817         |      |      | 0.755         |      |      | 0.739         |      |      |
| $r$ (Battjes)                      | 0.625                    |      |      | 0.601        |      |      | 0.641         |      |      | 0.542         |      |      | 0.519         |      |      |
| E [J], para $\nu=H_s/$             | 2                        | 3    | 4    | 2            | 3    | 4    | 2             | 3    | 4    | 2             | 3    | 4    | 2             | 3    | 4    |
| Envolvente, <b>ENV</b>             | 1.29                     | 1.94 | 2.59 | 1.08         | 1.63 | 2.17 | 1.42          | 2.12 | 2.83 | 0.87          | 1.31 | 1.75 | 0.84          | 1.26 | 1.68 |
| Envolvente, <b>RH</b>              | 0.40                     | 0.64 | 0.92 | 0.39         | 0.60 | 0.68 | 0.33          | 0.59 | 0.81 | 0.38          | 0.59 | 0.85 | 0.41          | 0.54 | 0.85 |
| Envolvente alis., <b>RHa</b>       | 1.27                     | 2.95 | 3.70 | 1.74         | 2.76 | 3.24 | 1.67          | 2.82 | 3.95 | 1.27          | 2.59 | 3.76 | 1.80          | 2.37 | 3.71 |
| Envolvente, <b>REIA</b>            | 1.05                     | 2.58 | 3.10 | 0.57         | 2.51 | 3.54 | 1.14          | 2.61 | 3.50 | 1.46          | 2.58 | 3.44 | 1.02          | 2.47 | 3.30 |
| Kimura espectral, <b>KE</b>        | 2.12                     | 3.09 | 4.32 | 2.04         | 2.97 | 4.17 | 2.17          | 3.16 | 4.42 | 1.89          | 2.74 | 3.86 | 1.83          | 2.66 | 3.76 |
| Longuet-Higgins, <b>LH</b>         | 2.13                     | 3.20 | 4.27 | 2.06         | 3.10 | 4.13 | 2.18          | 3.27 | 4.37 | 1.92          | 2.88 | 3.84 | 1.87          | 2.81 | 3.74 |
| Método directo, <b>DIR</b>         | 2.06                     | 3.34 | 4.60 | 1.96         | 3.09 | 4.42 | 2.06          | 3.55 | 5.46 | 2.29          | 3.88 | 4.92 | 2.45          | 3.24 | 5.65 |
| E [G]                              | 15.7                     | 7.8  | 7.0  | 15.2         | 7.5  | 6.8  | 16.1          | 8.0  | 7.2  | 14.2          | 7.0  | 6.3  | 13.8          | 6.8  | 6.2  |
| E[N <sub>G</sub> ] c/ $T_R=1200$ s | 9.1                      | 18.4 | 20.3 | 9.6          | 19.3 | 21.4 | 8.6           | 17.3 | 19.1 | 7.5           | 15.2 | 16.8 | 6.2           | 12.6 | 14.0 |

**Quadro 3-3 - Resultados da caracterização de grupos de ondas - registos 6 a 10**

| Características                                     | Identificação do registo |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |
|---|--------------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|
|   | 6                        |          |          | 7                |          |          | 8                |          |          | 9                |          |          | 10               |          |          |
| <b>Gerais do registo</b>                            |                          |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |
| Nome do ficheiro                                    | <b>SIM820</b>            |          |          | <b>SIM830</b>    |          |          | <b>SIM1020</b>   |          |          | <b>SIM1230</b>   |          |          | <b>SIM1620</b>   |          |          |
| Origem  | <b>Simulação</b>         |          |          | <b>Simulação</b> |          |          | <b>Simulação</b> |          |          | <b>Simulação</b> |          |          | <b>Simulação</b> |          |          |
| Forma do espectro                                   | JONSWAP                  |          |          | JONSWAP          |          |          | JONSWAP          |          |          | JONSWAP          |          |          | JONSWAP          |          |          |
| Escala: espaço e tempo                              | 1 e 1                    |          |          | 1 e 1            |          |          | 1 e 1            |          |          | 1 e 1            |          |          | 1 e 1            |          |          |
| Cte. multiplicativa, $k_s$                          | 1.0                      |          |          | 1.0              |          |          | 1.0              |          |          | 1.0              |          |          | 1.0              |          |          |
| No. de pontos, N                                    | 1400                     |          |          | 1400             |          |          | 1400             |          |          | 1400             |          |          | 1400             |          |          |
| Frequência, $f_d$ (Hz)                              | 0.67                     |          |          | 0.67             |          |          | 0.67             |          |          | 0.67             |          |          | 0.67             |          |          |
| Duração total, $T_R$ (s)                            | 2100                     |          |          | 2100             |          |          | 2100             |          |          | 2100             |          |          | 2100             |          |          |
| <b>Gerais do espectro</b>                           |                          |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |
| Freq. média, $f_{med}$ (Hz)                         | 0.132                    |          |          | 0.131            |          |          | 0.130            |          |          | 0.100            |          |          | 0.081            |          |          |
| Altura sign., $H_s$ (m)                             | 4.3                      |          |          | 6.1              |          |          | 4.2              |          |          | 6.3              |          |          | 5.5              |          |          |
| Período de pico, $T_p$ (s)                          | 8.54                     |          |          | 8.47             |          |          | 8.46             |          |          | 11.73            |          |          | 14.48            |          |          |
| Período médio, $T_z$ (s)                            | 7.36                     |          |          | 7.40             |          |          | 7.46             |          |          | 9.62             |          |          | 11.69            |          |          |
| <b>Parâmetros espectrais</b>                        |                          |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |
| $Q_p$ (Goda)  | 2.972                    |          |          | 3.084            |          |          | 2.964            |          |          | 2.621            |          |          | 2.455            |          |          |
| $Q_e$ (Medina & Hudspeth)                           | 3.244                    |          |          | 3.344            |          |          | 3.240            |          |          | 2.939            |          |          | 2.776            |          |          |
| $\nu$ (Longuet-Higgins)                             | 0.243                    |          |          | 0.241            |          |          | 0.247            |          |          | 0.301            |          |          | 0.333            |          |          |
| $\kappa$ (Battjes)                                  | 0.522                    |          |          | 0.541            |          |          | 0.523            |          |          | 0.505            |          |          | 0.498            |          |          |
| $r$ (Battjes)                                       | 0.254                    |          |          | 0.273            |          |          | 0.255            |          |          | 0.238            |          |          | 0.230            |          |          |
| <b>E [J], para <math>\nu=HS/</math></b>             | <b>2</b>                 | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>2</b>         | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>2</b>         | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>2</b>         | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>2</b>         | <b>3</b> | <b>4</b> |
| Envolvente, <b>ENV</b>                              | 0.84                     | 1.27     | 1.69     | 0.85             | 1.28     | 1.71     | 0.83             | 1.25     | 1.67     | 0.69             | 1.04     | 1.38     | 0.63             | 0.95     | 1.26     |
| Envolvente, <b>RH</b>                               | 0.34                     | 0.56     | 0.70     | 0.35             | 0.57     | 0.78     | 0.38             | 0.55     | 0.74     | 0.33             | 0.46     | 0.62     | 0.29             | 0.46     | 0.56     |
| Envolvente alis., <b>RHa</b>                        | 1.04                     | 1.83     | 2.62     | 1.22             | 1.65     | 2.51     | 1.31             | 1.84     | 2.23     | 0.47             | 1.58     | 2.24     | 0.20             | 1.72     | 2.69     |
| Envolvente, <b>REIA</b>                             | 0.54                     | 1.80     | 2.72     | 0.61             | 1.84     | 2.84     | 0.97             | 2.38     | 2.56     | 1.20             | 1.99     | 3.02     | 1.28             | 1.67     | 2.91     |
| Kimura espectral, <b>KE</b>                         | 1.41                     | 2.04     | 2.99     | 1.43             | 2.07     | 3.03     | 1.41             | 2.04     | 2.99     | 1.39             | 2.01     | 2.96     | 1.38             | 2.00     | 2.94     |
| Longuet-Higgins, <b>LH</b>                          | 1.48                     | 2.22     | 2.96     | 1.50             | 2.25     | 3.01     | 1.48             | 2.23     | 2.97     | 1.47             | 2.20     | 2.93     | 1.46             | 2.19     | 2.92     |
| Método directo, <b>DIR</b>                          | 1.40                     | 2.73     | 6.53     | 1.50             | 3.04     | 5.47     | 1.82             | 3.08     | 4.81     | 1.43             | 2.70     | 4.76     | 1.31             | 2.16     | 3.41     |
| <b>E [G]</b>  | 10.9                     | 5.4      | 4.9      | 11.1             | 5.5      | 5.0      | 10.9             | 5.4      | 4.9      | 10.9             | 5.4      | 4.8      | 10.8             | 5.3      | 4.8      |
| <b>E [N<sub>6</sub>] c/ <math>T_R=1200</math> s</b> | 14.9                     | 30.2     | 33.4     | 14.6             | 29.6     | 32.7     | 14.7             | 29.7     | 32.9     | 11.5             | 23.3     | 25.8     | 9.5              | 19.3     | 21.3     |

**Quadro 3-4 - Resultados da caracterização de grupos de ondas - registos 11 a 15**

| Características                                 | Identificação do registo |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |
|---|--------------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|
|   | 11                       |          |          | 12               |          |          | 13               |          |          | 14               |          |          | 15               |          |          |
| <b>Gerais do registo</b>                        |                          |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |
| Nome do ficheiro                                | <b>SIMJON1</b>           |          |          | <b>SIMJON2</b>   |          |          | <b>SIMJON3</b>   |          |          | <b>SIMJON4</b>   |          |          | <b>SIMPMI1</b>   |          |          |
| Origem  | <b>Simulação</b>         |          |          | <b>Simulação</b> |          |          | <b>Simulação</b> |          |          | <b>Simulação</b> |          |          | <b>Simulação</b> |          |          |
| Forma do espectro                               | JONSWAP                  |          |          | JONSWAP          |          |          | JONSWAP          |          |          | JONSWAP          |          |          | P-M (ITTC)       |          |          |
| Escala: espaço e tempo                          | 4                        |          |          | 4                |          |          | 4                |          |          | 8                |          |          | 4                |          |          |
| Cte. multiplicativa, $k_s$                      | 10                       |          |          | 10               |          |          | 12               |          |          | 12               |          |          | -                |          |          |
| No. de pontos, N                                | 1200                     |          |          | 1200             |          |          | 1200             |          |          | 1200             |          |          | 1200             |          |          |
| Frequência, $f_d$ (Hz)                          | 1                        |          |          | 1                |          |          | 1                |          |          | 1                |          |          | 1                |          |          |
| Duração total, $T_R$ (s)                        | 1200                     |          |          | 1200             |          |          | 1200             |          |          | 1200             |          |          | 1200             |          |          |
| <b>Gerais do espectro</b>                       |                          |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |
| Freq. média, $f_{med}$ (Hz)                     | 0.1145                   |          |          | 0.1157           |          |          | 0.0987           |          |          | 0.0976           |          |          | 0.1203           |          |          |
| Altura sign., $H_s$ (m)                         | 4.0                      |          |          | 4.0              |          |          | 3.8              |          |          | 7.9              |          |          | 4.1              |          |          |
| Período de pico, $T_p$ (s)                      | 9.84                     |          |          | 9.84             |          |          | 11.76            |          |          | 12.00            |          |          | 10.53            |          |          |
| Período médio, $T_z$ (s)                        | 8.44                     |          |          | 8.34             |          |          | 9.69             |          |          | 9.79             |          |          | 7.98             |          |          |
| <b>Parâmetros espectrais</b>                    |                          |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |
| $Q_p$ (Goda)                                    | 3.040                    |          |          | 2.843            |          |          | 2.557            |          |          | 2.571            |          |          | 2.138            |          |          |
| $Q_e$ (Medina & Hudspeth)                       | 3.346                    |          |          | 3.148            |          |          | 2.866            |          |          | 2.899            |          |          | 2.370            |          |          |
| $\nu$ (Longuet-Higgins)                         | 0.268                    |          |          | 0.273            |          |          | 0.306            |          |          | 0.308            |          |          | 0.291            |          |          |
| $\kappa$ (Battjes)                              | 0.559                    |          |          | 0.529            |          |          | 0.486            |          |          | 0.503            |          |          | 0.403            |          |          |
| $r$ (Battjes)                                   | 0.292                    |          |          | 0.261            |          |          | 0.219            |          |          | 0.235            |          |          | 0.150            |          |          |
| <b>E [J], para <math>\nu=HS/</math></b>         | <b>2</b>                 | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>2</b>         | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>2</b>         | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>2</b>         | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>2</b>         | <b>3</b> | <b>4</b> |
| Envolvente, <b>ENV</b>                          | 0.77                     | 1.16     | 1.54     | 0.76             | 1.14     | 1.52     | 0.68             | 1.02     | 1.36     | 0.68             | 1.02     | 1.35     | 0.71             | 1.07     | 1.43     |
| Envolvente, <b>RH</b>                           | 0.37                     | 0.48     | 0.63     | 0.35             | 0.55     | 0.79     | 0.35             | 0.45     | 0.67     | 0.29             | 0.45     | 0.66     | 0.31             | 0.45     | 0.67     |
| Envolvente alis., <b>RHa</b>                    | 1.22                     | 1.25     | 2.15     | 0.97             | 1.61     | 2.96     | 1.01             | 1.49     | 1.97     | 0.80             | 1.68     | 2.36     | 0.86             | 1.70     | 2.68     |
| Envolvente, <b>REIA</b>                         | 1.07                     | 1.61     | 2.22     | 1.08             | 1.69     | 2.47     | 0.00             | 1.30     | 2.20     | 0.00             | 1.51     | 2.38     | 0.00             | 1.32     | 2.50     |
| Kimura espectral, <b>KE</b>                     | 1.45                     | 2.10     | 3.06     | 1.42             | 2.05     | 3.00     | 1.37             | 1.98     | 2.92     | 1.39             | 2.01     | 2.95     | 1.30             | 1.88     | 2.81     |
| Longuet-Higgins, <b>LH</b>                      | 1.52                     | 2.29     | 3.05     | 1.49             | 2.23     | 2.98     | 1.45             | 2.17     | 2.89     | 1.46             | 2.19     | 2.93     | 1.38             | 2.07     | 2.77     |
| Método directo, <b>DIR</b>                      | 1.36                     | 1.90     | 3.83     | 1.21             | 2.39     | 3.42     | 1.09             | 2.25     | 3.60     | 1.08             | 2.23     | 3.47     | 1.07             | 2.28     | 3.79     |
| <b>E [G]</b>                                    | 11.2                     | 5.6      | 5.0      | 11.0             | 5.4      | 4.9      | 10.7             | 5.3      | 4.8      | 10.8             | 5.3      | 4.8      | 10.2             | 5.0      | 4.6      |
| <b>E[N<sub>6</sub>] c/ T<sub>R</sub>=1200 s</b> | 12.7                     | 25.5     | 28.3     | 13.1             | 26.5     | 29.3     | 11.6             | 23.5     | 26.0     | 11.4             | 23.0     | 25.4     | 14.7             | 29.9     | 32.9     |



**Quadro 3-5 - Resultados da caracterização de grupos de ondas - registos 16 a 20**

| Características                                 | Identificação do registo |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |
|---|--------------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|
|   | 16                       |          |          | 17               |          |          | 18               |          |          | 19               |          |          | 20               |          |          |
| <b>Gerais do registo</b>                        |                          |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |
| Nome do ficheiro                                | <b>SIMPMI2</b>           |          |          | <b>SIMPMG1</b>   |          |          | <b>SIMPMG2</b>   |          |          | <b>SIMPMG3</b>   |          |          | <b>SIMPMG4</b>   |          |          |
| Origem  | <b>Simulação</b>         |          |          | <b>Simulação</b> |          |          | <b>Simulação</b> |          |          | <b>Simulação</b> |          |          | <b>Simulação</b> |          |          |
| Forma do espectro                               | P-M (ITTC)               |          |          | P-M GEN          |          |          | P-M GEN          |          |          | P-M GEN          |          |          | P-M GEN          |          |          |
| Escala: espaço e tempo                          | 4                        |          |          | 4                |          |          | 4                |          |          | 4                |          |          | 8                |          |          |
| Cte. multiplicativa, $k_s$                      | -                        |          |          | 10               |          |          | 10               |          |          | 12               |          |          | 12               |          |          |
| No. de pontos, N                                | 1200                     |          |          | 1200             |          |          | 1200             |          |          | 1200             |          |          | 1200             |          |          |
| Frequência, $f_d$ (Hz)                          | 1                        |          |          | 1                |          |          | 1                |          |          | 1                |          |          | 1                |          |          |
| Duração total, $T_R$ (s)                        | 1200                     |          |          | 1200             |          |          | 1200             |          |          | 1200             |          |          | 1200             |          |          |
| <b>Gerais do espectro</b>                       |                          |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |
| Freq. média, $f_{med}$ (Hz)                     | 0.1227                   |          |          | 0.1226           |          |          | 0.1215           |          |          | 0.1046           |          |          | 0.1032           |          |          |
| Altura sign., $H_s$ (m)                         | 3.9                      |          |          | 3.9              |          |          | 4.0              |          |          | 3.9              |          |          | 7.9              |          |          |
| Período de pico, $T_p$ (s)                      | 9.60                     |          |          | 9.84             |          |          | 10.34            |          |          | 12.24            |          |          | 11.65            |          |          |
| Período médio, $T_z$ (s)                        | 7.84                     |          |          | 7.84             |          |          | 7.89             |          |          | 9.07             |          |          | 9.21             |          |          |
| <b>Parâmetros espectrais</b>                    |                          |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |                  |          |          |
| $Q_p$ (Goda)                                    | 2.143                    |          |          | 2.142            |          |          | 2.093            |          |          | 1.924            |          |          | 1.963            |          |          |
| $Q_e$ (Medina & Hudspeth)                       | 2.352                    |          |          | 2.350            |          |          | 2.310            |          |          | 2.193            |          |          | 2.202            |          |          |
| $v$ (Longuet-Higgins)                           | 0.286                    |          |          | 0.287            |          |          | 0.294            |          |          | 0.334            |          |          | 0.327            |          |          |
| $\kappa$ (Battjes)                              | 0.399                    |          |          | 0.397            |          |          | 0.398            |          |          | 0.363            |          |          | 0.384            |          |          |
| $r$ (Battjes)                                   | 0.147                    |          |          | 0.145            |          |          | 0.147            |          |          | 0.122            |          |          | 0.136            |          |          |
| <b>E [J], para <math>v=HS/</math></b>           | <b>2</b>                 | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>2</b>         | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>2</b>         | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>2</b>         | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>2</b>         | <b>3</b> | <b>4</b> |
| Envolvente, <b>ENV</b>                          | 0.73                     | 1.09     | 1.45     | 0.72             | 1.09     | 1.45     | 0.71             | 1.06     | 1.41     | 0.63             | 0.94     | 1.26     | 0.64             | 0.96     | 1.28     |
| Envolvente, <b>RH</b>                           | 0.31                     | 0.53     | 0.68     | 0.35             | 0.52     | 0.74     | 0.34             | 0.52     | 0.71     | 0.39             | 0.52     | 0.65     | 0.33             | 0.50     | 0.64     |
| Envolvente alis., <b>RHa</b>                    | 0.88                     | 1.33     | 2.50     | 0.93             | 1.42     | 2.12     | 0.89             | 1.47     | 2.00     | 0.72             | 1.49     | 2.25     | 1.03             | 1.32     | 2.39     |
| Envolvente, <b>REIA</b>                         | 0.00                     | 1.23     | 2.18     | 0.00             | 1.53     | 2.70     | 0.00             | 1.53     | 2.67     | 0.00             | 1.29     | 2.87     | 1.19             | 1.59     | 2.14     |
| Kimura espectral, <b>KE</b>                     | 1.29                     | 1.88     | 2.81     | 1.29             | 1.88     | 2.80     | 1.29             | 1.88     | 2.80     | 1.27             | 1.84     | 2.77     | 1.28             | 1.86     | 2.79     |
| Longuet-Higgins, <b>LH</b>                      | 1.38                     | 2.07     | 2.76     | 1.38             | 2.07     | 2.76     | 1.38             | 2.07     | 2.76     | 1.36             | 2.04     | 2.72     | 1.37             | 2.06     | 2.74     |
| Método directo, <b>DIR</b>                      | 1.06                     | 1.79     | 3.91     | 1.38             | 2.19     | 3.70     | 1.20             | 2.21     | 3.57     | 1.33             | 1.96     | 2.28     | 1.07             | 1.96     | 2.76     |
| <b>E [G]</b>                                    | 10.2                     | 5.0      | 4.6      | 10.2             | 5.0      | 4.6      | 10.2             | 5.0      | 4.6      | 10.0             | 5.0      | 4.5      | 10.1             | 5.0      | 4.5      |
| <b>E[N<sub>6</sub>] c/ T<sub>R</sub>=1200 s</b> | 15.0                     | 30.4     | 33.6     | 15.0             | 30.4     | 33.6     | 14.9             | 30.2     | 33.4     | 13.2             | 26.7     | 29.5     | 12.9             | 26.0     | 28.8     |

**KE método de Kimura Espectral** - Trata-se da Eq. (3-19), em que  $p_{22}$  é calculado de acordo com o método de Kimura Espectral.

**DIR método DIRECTO** - Este é o método de referência. Consiste em, a partir de um registo, calcular as alturas de onda, contar as ondas cuja cristas excedem o nível  $v$ , contar as ondas em cada grupo de ondas, e, finalmente, calcular a média aritmética dos números de ondas dos diferentes grupos presentes no registo. Este método produz o valor de  $E[J]$  que realmente ocorre no registo e, por isso, é o padrão pelo qual serão julgados todos os outros métodos.

Além das características de cada registo, aparecem nos Quadros 3-2 a 3-5 as características do respectivo espectro (entre as quais, diversos parâmetros espectrais de que se dão pormenores na Secção 3.7.2), estimativas de  $E[J]$  obtidas pelos vários métodos mencionados acima e, ainda, valores de  $E[G]$  e  $E[N_G]$  calculados a partir do valor de  $E[J]$ , obtido pela fórmula de Longuet-Higgins, Eq. (3-33).

O Quadro 3-2 mostra os resultados obtidos para 5 registos reais produzidos num canal de ondas irregulares do LNEC, para os níveis  $v = H_s/2, H_s/3$  e  $H_s/4$ , ao passo que o Quadro 3-3 apresenta, para os mesmos níveis, os resultados obtidos para 5 registos simulados com espectros de características o mais possível idênticas às dos espectros fornecidos ao batedor de ondas que estiveram na origem dos resultados apresentados no Quadro 3-2 (essas características comuns estão assinaladas no Quadro 3-1 através de dois rectângulos desenhados a traço interrompido).

Os Quadros 3-4 e 3-5 mostram os resultados, para os mesmos níveis, obtidos para 10 registos simulados com os espectros de JONSWAP - 4 registos, Pierson-Moskowitz (ITTC) - 2 registos e Pierson-Moskowitz generalizado - 4 registos.

Tanto no caso dos registos do canal como no dos registos simulados, os resultados permitem nitidamente separar os métodos em três grupos, além do método directo:

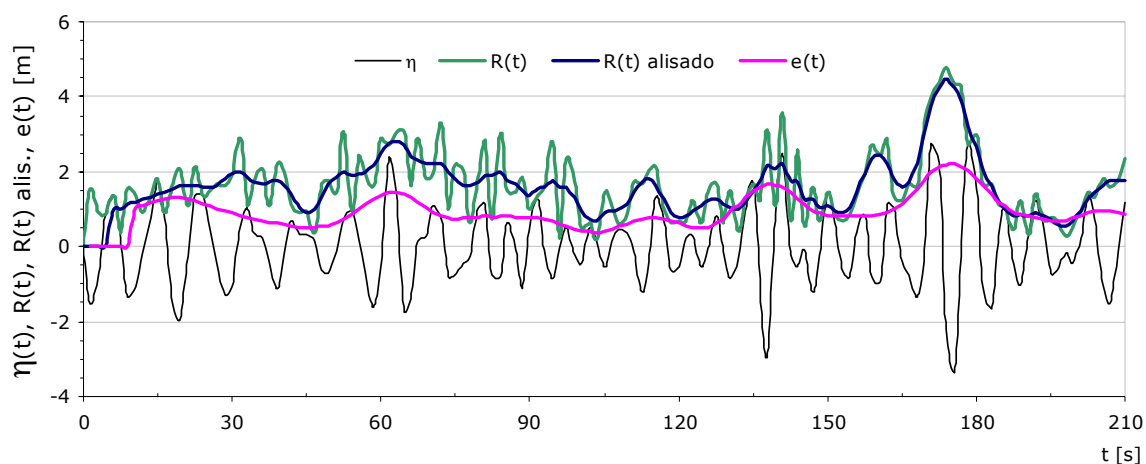
- O método que utiliza a envolvente de Rice/Hilbert (RH).
- Os métodos Longuet-Higgins e Kimura Espectral (LH e KE).
- Os métodos para os quais foi necessário algum tipo de alisamento (REIA e RHa), mais incertos por força da arbitrariedade das características do alisamento utilizado.

No primeiro (RH), obtêm-se valores sistematicamente muito inferiores aos valores de referência (os do método directo).

Nos segundos (LH e KE), obtêm-se valores da mesma ordem de grandeza.

Os terceiros (REIA e RHa), apresentam, como se disse, valores bastante incertos, principalmente devido ao facto de dependerem fortemente das características do alisamento.

A Fig. 3-9 mostra um extracto de um registo  $\eta(t)$  e as correspondentes funções envolventes,  $R(t)$ , " $R(t)$  alisado" e  $e(t)$ , correspondentes aos métodos RH, RHa e REIA, respectivamente.



**Fig. 3-9 - Extracto de um sinal  $\eta$ , e as suas envolventes  $R(t)$ , " $R(t)$  alisado" e  $e(t)$ , correspondentes aos métodos RH, RHa e REIA**

Note-se que a obtenção numérica da TH, necessária à determinação da envolvente RH (e RHa) para os métodos baseados no conceito de envolvente, pode fazer-se por dois meios distintos, designados neste trabalho por método M1 e método M2:

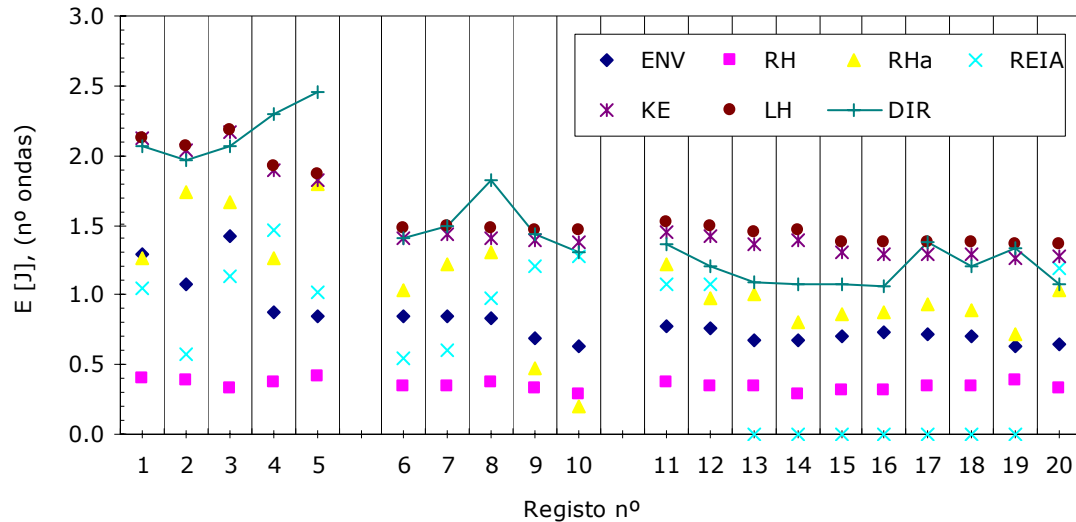
- M1 - Através do cálculo da TF, em senos, a qual fornece os coeficientes dos senos,  $a_n$ , e as fases,  $\beta_n$ , de  $\eta(t)$ , seguindo-se a obtenção de  $\hat{\eta}(t) = TH[\eta(t)]$ , pelo somatório dos termos agora com cosenos e com as mesmas fases  $\beta_n$ . Este método é aplicável a qualquer registo, real ou simulado. A TH assim estimada é aproximada, pois depende do cálculo numérico. Uma forma de ajuizar da sua qualidade é reconstituir  $\eta(t)$ , a partir do somatório de senos.
- M2 - Só para o caso de registos simulados, parte-se de um somatório de senos com coeficientes obtidos de um espectro e com fases aleatórias. A TH é obtida substituindo nesse somatório os senos pelos cosenos e, por isso, é exacta.

A partir de cálculos efectuados com uma versão inicial do programa **AGRUPA**, verificou-se que os valores de  $E[J]$  obtidos pelo método M1 eram da ordem de metade dos valores obtidos pelo método M2. Esta diferença pode explicar-se pelo facto de que a envolvente obtida pelo método M1 é pouco adequada. Realmente, ela apresenta algumas oscilações não justificadas pelo sinal. Isso vê-se facilmente dos gráficos apresentados na Fig. 3-9. Disto resulta que há pequenas excursões superiores que vão contar como pequenos grupos de ondas e que, na verdade, não correspondem a tal, o que faz baixar o valor de  $E[J]$ .

Conclui-se que, de momento, os métodos baseados na envolvente RH não são satisfatórios. Isso é devido à deficiente qualidade da envolvente produzida,  $R(t)$ , como se pode apreciar no extracto da Fig. 3-9.

Da análise dos restantes métodos de cálculo da envolvente, a primeira conclusão interessante é que a envolvente  $e(t)$ , obtida pelo método REIA, parece ser superior à  $R(t)$  do método RH.

As Figs. 3-10 e 3-11 comparam graficamente os valores de  $E[J]$  para os diferentes registos, para dois ( $v = H_S/2$  e  $H_S/3$ ) dos três níveis considerados, calculados através do uso dos métodos referidos (à excepção de M2) para os 20 registos considerados, 15 deles simulados e os restantes 5 obtidos do canal de ondas irregulares.



**Fig. 3-10 - Comparação de métodos de estimação de  $E[J]$ , para o nível  $v = H_S/2$**

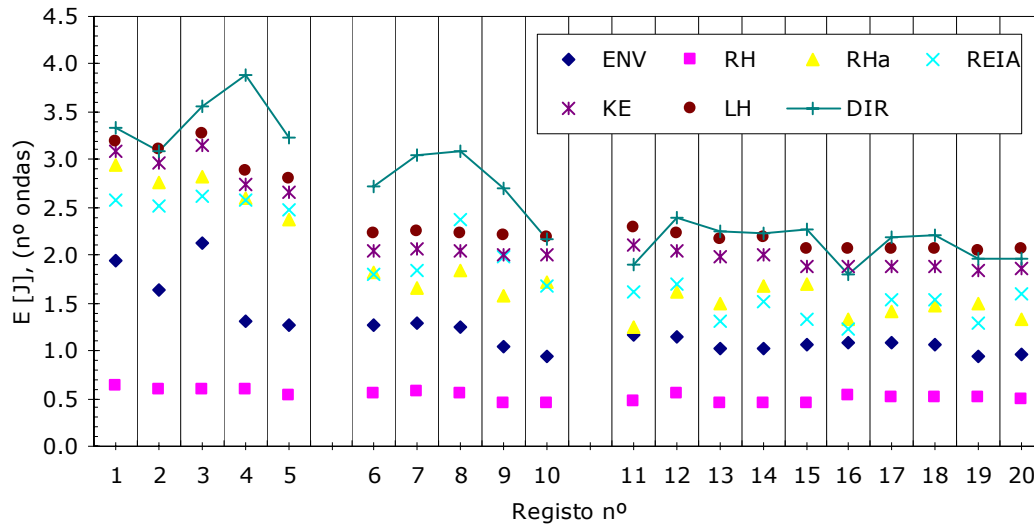
Nestas figuras identificam-se os três tipos de registos:

- registos do canal (1 a 5)
- registos simulados (6 a 10) com as características do espectro fornecido ao batedor de ondas que originou os registos anteriores
- registos simulados com diferentes formas de espectros, mas com as outras características idênticas: espectro JONSWAP (11 a 14), espectro Pierson-Moskowitz ITTC (15 e 16) e espectro Pierson-Moskowitz generalizado (17 a 20).

Este resultados confirmam e estendem os resultados de Yu e Liu, 1990. Confirmam porque os resultados de comparação dos métodos a que estes autores chegaram são idênticos aos do presente trabalho e estendem porque, para além de registos simulados numericamente, utilizaram-se no presente trabalho também dados de canal.

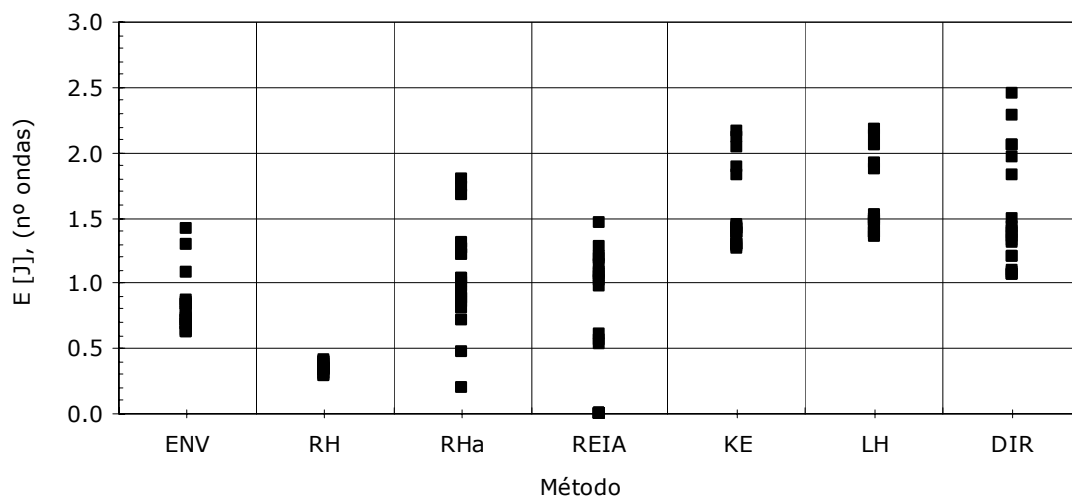
De realçar que, para o nível  $H_S/2$ , o comportamento da envolvente do método REIA é bastante irregular, apesar de nos pontos em que esta não é nula apresentar valores razoáveis comparados com os valores de referência. Como se poderá ver nas figuras que apresentam graficamente a evolução da envolvente  $e(t)$ , verifica-se que, para certos registos, apesar de esta ser bastante suave, é também bastante inferior aos máximos do registo, razão pela qual não há cruzamentos para certos níveis (ver Fig. 3-34, por exemplo, mais à frente).

Note-se, agora, na Fig. 3-11, valores de  $E[J]$  da envolvente do método REIA mais razoáveis, pelo facto de o nível ser mais reduzido. Para este nível, os métodos REIA e RHa estão bastante próximos, aproximando-se, por defeito, dos métodos DIR, LH e KE.



**Fig. 3-11 - Comparação de métodos de estimação de  $E[J]$ , para o nível  $v = H_s/3$**

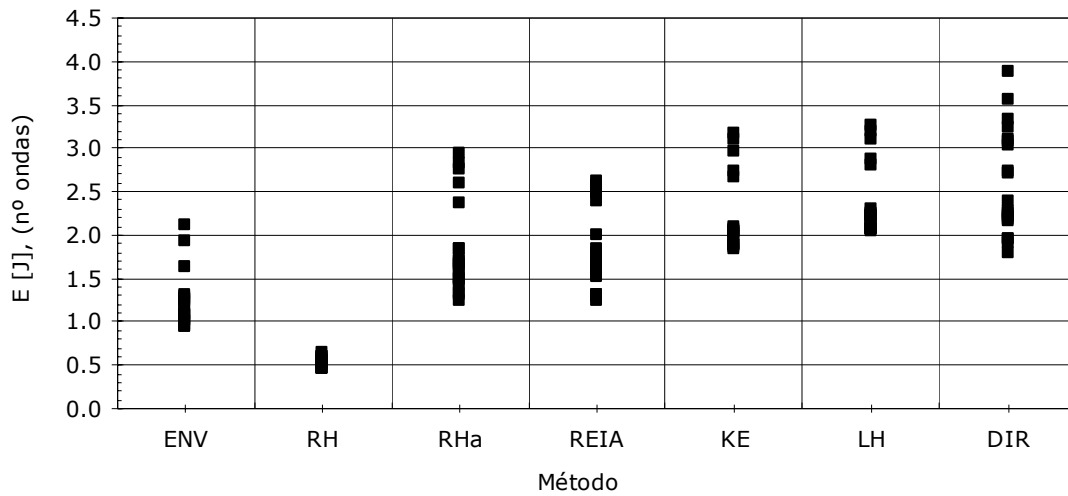
Pelo exposto, parece ser de rejeitar os métodos baseados na envolvente de Rice/Hilbert (RH, RHa e ENV) e REIA, preferindo os outros. No entanto, importa ainda analisar mais de perto os diferentes métodos, com os mesmos valores mas pondo em evidência a variabilidade dos resultados - Figs. 3-12 e 3-13.



**Fig. 3-12 - Variabilidade dos métodos de estimação de  $E[J]$ , para o nível  $v = H_s/2$**

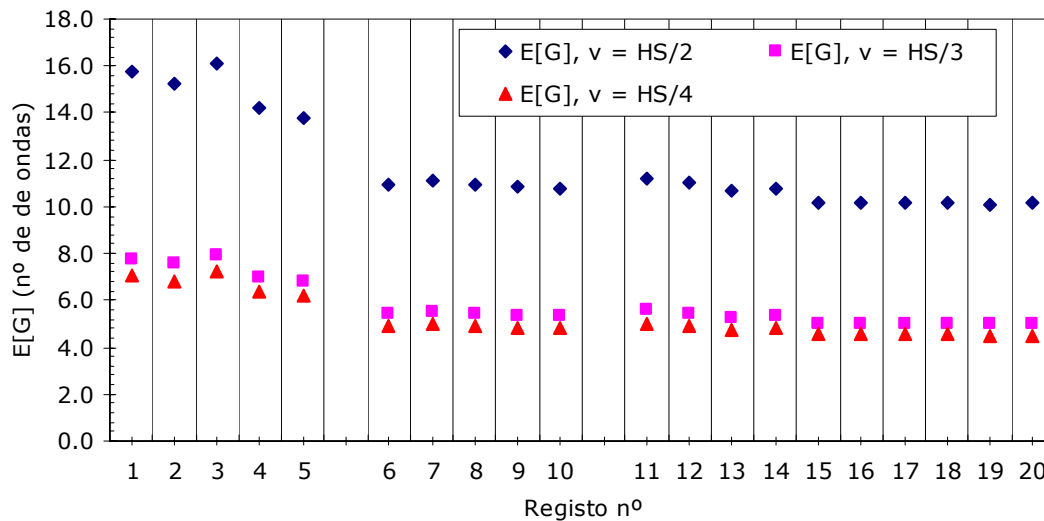
Tanto a Fig. 3-12 como a Fig. 3-13 mostram a variabilidade dos resultados do cálculo de  $E[J]$  nos 20 registos considerados, para os níveis  $v = H_s/2$  e  $H_s/3$ . Verifica-se que o método que conduz a menor variabilidade é o método RH, precisamente o pior dos métodos (não por apresentar resulta-

dos com menor variabilidade que o método de referência, mas por originar valores de  $E[J]$  substancialmente mais reduzidos do que os desse método de referência).



**Fig. 3-13 - Variabilidade dos métodos de estimação de  $E[J]$ , para o nível  $v = H_s/3$**

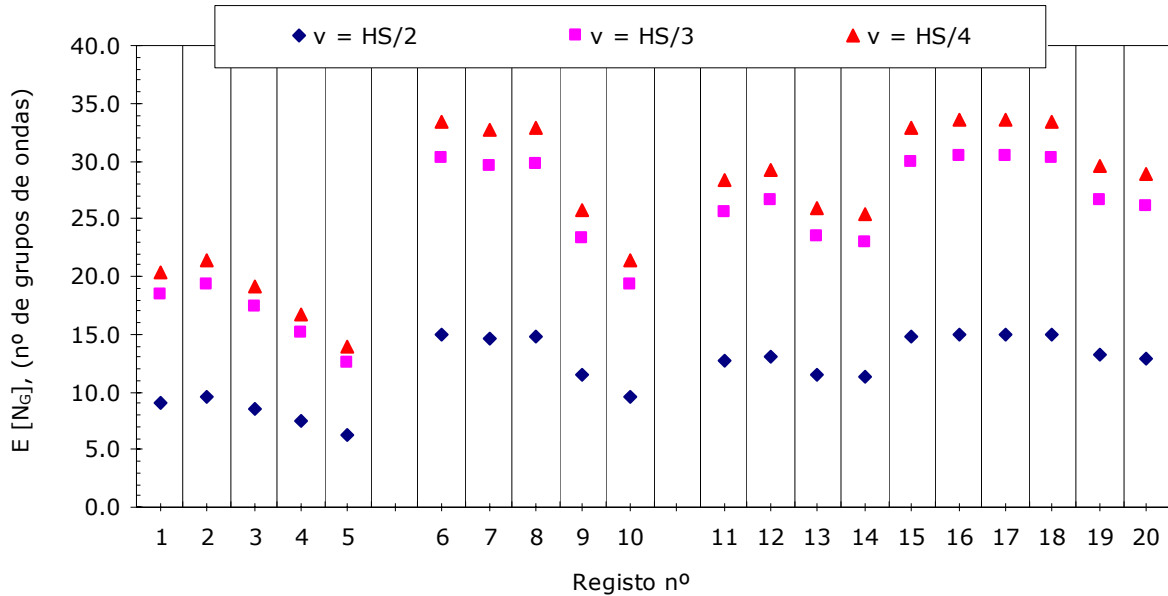
Da mesma forma que se analisou  $E[J]$ , pode estudar-se o valor médio do número de ondas existente entre começos de dois grupos sucessivos,  $E[G]$ . Na Fig. 3-14 representa-se este parâmetro para os diferentes registos e para os níveis  $H_s/2$ ,  $H_s/3$  e  $H_s/4$ , calculado apenas pelo método LH, Eq. (3-34), visto este ser dos mais rigorosos e o mais simples.



**Fig. 3-14 - Análise de  $E[G]$  para os níveis  $v = H_s/2, H_s/3$  e  $H_s/4$  - método LH**

Note-se que o método LH, apesar de conter as fórmulas de Longuet-Higgins (que, como se sabe, foram baseadas na envolvente teórica de Rice/Hilbert), dispensa a utilização dessa mesma envolvente para a posterior determinação das durações dos grupos de onda acima de  $v$  e de  $E[J]$ , como se faz nos métodos RH e RHa, os quais produzem maus resultados neste trabalho.

Outro parâmetro de interesse que pode ser estudado é o número médio de grupos de ondas de nível  $v$ ,  $E[N_G]$ , presentes num determinado registo de duração  $T_R$ , Eq. (3-51). Na Fig. 3-15 mostra-se, para cada registo, o valor deste parâmetro para os níveis  $H_S/2$ ,  $H_S/3$  e  $H_S/4$ .



**Fig. 3-15 - Análise de  $E[N_G]$  para os níveis  $v = H_S/2$ ,  $H_S/3$  e  $H_S/4$  - método LH**

Obviamente, houve que arbitrar um valor para a duração do registo,  $T_R$ . Como se fez atrás para as simulações numéricas 11 a 20, considerou-se  $T_R = 1200$  s (Quadro 3-1).

Do exposto nesta secção conclui-se que os valores de  $E[J]$  (e, conseqüentemente, os de  $E[G]$  e de  $E[N_G]$ ) obtidos pelo método KE, Eq. (3-19), e método LH, Eq. (3-33), aproximam-se muito satisfatoriamente dos valores de referência (método directo). Conclui-se igualmente, pelas razões atrás apontadas, que os métodos baseados na envolvente de Rice/Hilbert (RH, RHa e ENV), assim como o método REIA, não são satisfatórios.

A seguir apresentam-se três conjuntos de simulações numéricas, correspondentes a igual número de espectros empíricos (JONSWAP, Pierson-Moskowitz ITTC e Pierson-Moskowitz Generalizado) e respectivos resultados de aplicação dos programas de caracterização de grupos de ondas, com as características comuns indicadas no Quadro 3-6.

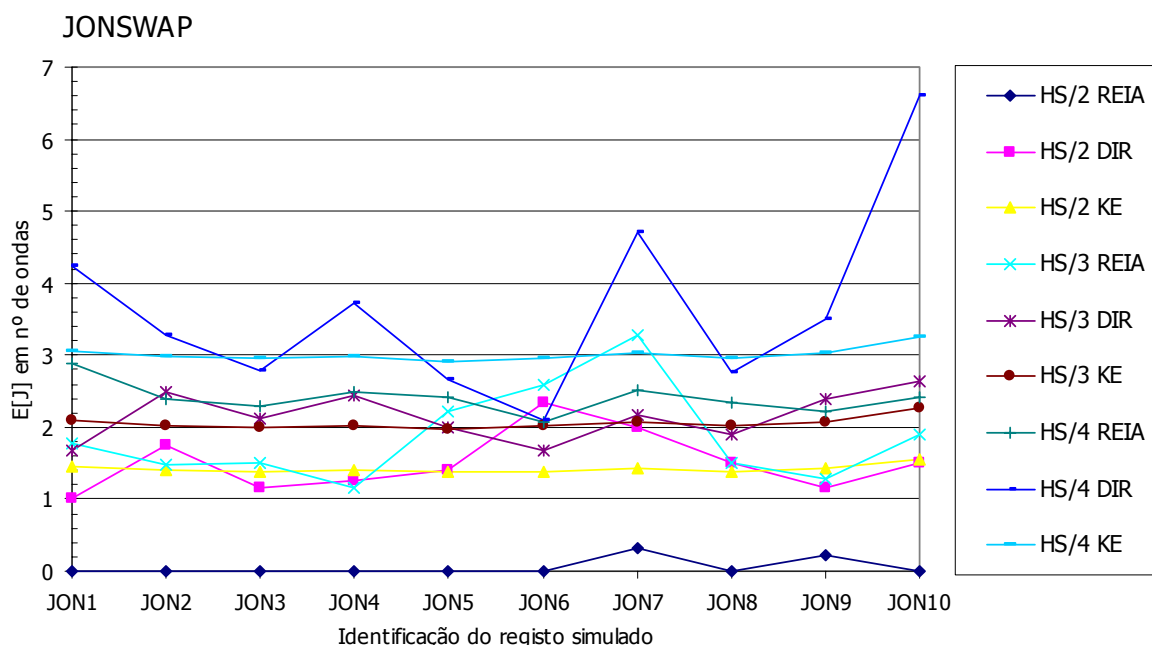
**Quadro 3-6 - Características dos registos simulados numericamente**

|  |     |    |
|--|-----|----|
| Duração total do registo, $T_R$                  | 300 | s  |
|  | 0.5 | s  |
| Nº de sinusóides para definição do espectro, $N$ | 100 |    |
| Frequência de corte ou máxima, $f_{max}$         | 0.5 | Hz |

Assim, no Quadro 3-7 e na Fig. 3-16 apresentam-se 10 simulações numéricas (com designações **JON1** a **JON10**) referentes a um espectro JONSWAP (de características indicadas no Quadro 3-6) e respectivos resultados em termos dos diversos métodos de caracterização de grupos de onda, de acordo com o descrito atrás nesta secção. Neste quadro, e nos dois que se seguem, **m** e **dp** são os valores da média e do desvio-padrão de  $E[J]$  para os 10 registos considerados.

**Quadro 3-7 - Análise de grupos de ondas em registos simulados – JONSWAP**

| Valores de $E[J]$ para 10 registos simulados (JON1 a JON10) - Espectro JONSWAP |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |             |             |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------------|-------------|
| Nível  | Tipo | JON1 | JON2 | JON3 | JON4 | JON5 | JON6 | JON7 | JON8 | JON9 | JON10 | m           | dp          |
| HS/2   | REIA | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.31 | 0.00 | 0.23 | 0.00  | <b>0.05</b> | <b>0.12</b> |
|  | DIR  | 1.00 | 1.75 | 1.17 | 1.25 | 1.40 | 2.33 | 2.00 | 1.50 | 1.17 | 1.50  | <b>1.51</b> | <b>0.41</b> |
|  | KE   | 1.45 | 1.40 | 1.38 | 1.40 | 1.37 | 1.39 | 1.44 | 1.39 | 1.43 | 1.56  | <b>1.42</b> | <b>0.06</b> |
| HS/3   | REIA | 1.78 | 1.47 | 1.51 | 1.16 | 2.22 | 2.59 | 3.28 | 1.51 | 1.28 | 1.90  | <b>1.87</b> | <b>0.66</b> |
|  | DIR  | 1.67 | 2.50 | 2.13 | 2.43 | 2.00 | 1.67 | 2.17 | 1.89 | 2.38 | 2.63  | <b>2.15</b> | <b>0.34</b> |
|  | KE   | 2.10 | 2.03 | 2.00 | 2.03 | 1.98 | 2.02 | 2.08 | 2.01 | 2.07 | 2.26  | <b>2.06</b> | <b>0.08</b> |
| HS/4   | REIA | 2.89 | 2.40 | 2.28 | 2.49 | 2.42 | 2.07 | 2.51 | 2.35 | 2.22 | 2.42  | <b>2.41</b> | <b>0.22</b> |
|  | DIR  | 4.25 | 3.29 | 2.78 | 3.71 | 2.67 | 2.10 | 4.71 | 2.75 | 3.50 | 6.60  | <b>3.64</b> | <b>1.30</b> |
|  | KE   | 3.06 | 2.98 | 2.95 | 2.98 | 2.92 | 2.97 | 3.04 | 2.96 | 3.02 | 3.25  | <b>3.01</b> | <b>0.09</b> |



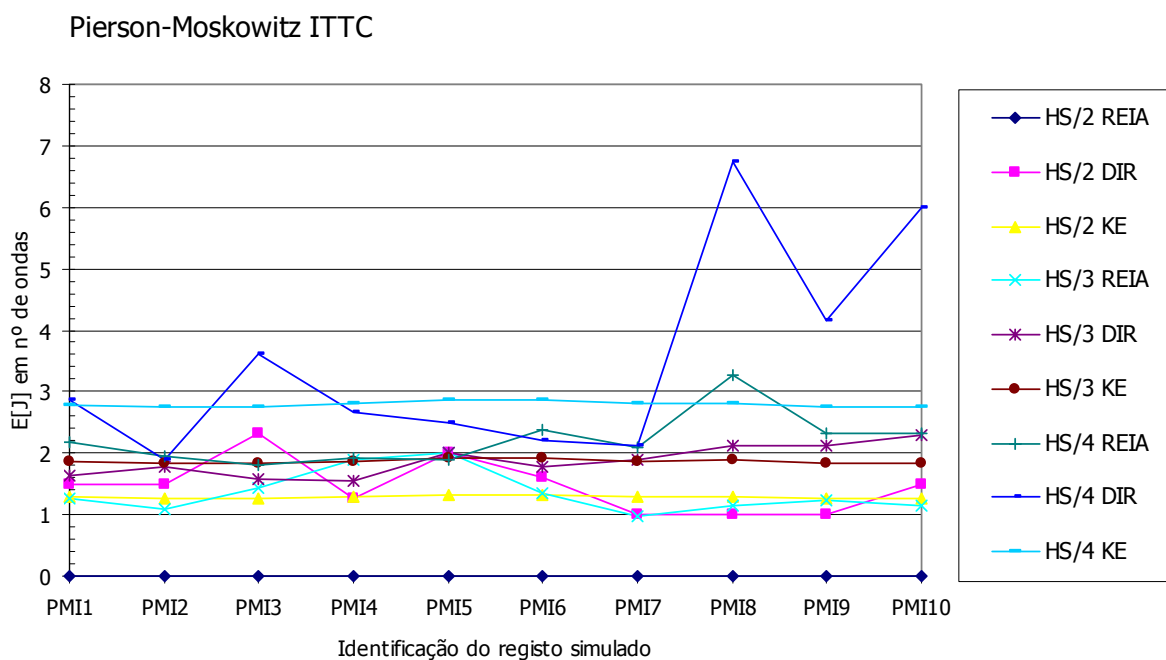
**Fig. 3-16 - Análise de  $E[J]$  para os níveis  $v = H_s/2, H_s/3$  e  $H_s/4$ , utilizando os métodos REIA, DIR e KE – Espectro JONSWAP**



De igual forma, no Quadro 3-8 e na Fig. 3-17, apresentam-se 10 simulações numéricas, identificadas como **PMI1** a **PMI10**, referentes a um espectro Pierson-Moskowitz ITTC (de características indicadas no Quadro 3-6) e respectivos resultados.

**Quadro 3-8 - Análise de grupos de ondas em registos simulados – P-M (ITTC)**

| Valores de $E[J]$ para 10 registos simulados (PMI1 a PMI10) - Espectro Pierson-Moskowitz ITTC |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |             |             |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------------|-------------|
| Nível   | Tipo | PMI1 | PMI2 | PMI3 | PMI4 | PMI5 | PMI6 | PMI7 | PMI8 | PMI9 | PMI10 | m           | dp          |
| HS/2  | REIA | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00  | <b>0.00</b> | <b>0.00</b> |
|   | DIR  | 1.50 | 1.50 | 2.33 | 1.25 | 2.00 | 1.60 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.50  | <b>1.47</b> | <b>0.44</b> |
|   | KE   | 1.28 | 1.26 | 1.26 | 1.29 | 1.33 | 1.33 | 1.29 | 1.30 | 1.26 | 1.26  | <b>1.29</b> | <b>0.03</b> |
| HS/3  | REIA | 1.27 | 1.10 | 1.42 | 1.90 | 2.01 | 1.35 | 0.98 | 1.16 | 1.23 | 1.14  | <b>1.36</b> | <b>0.34</b> |
|   | DIR  | 1.63 | 1.78 | 1.57 | 1.56 | 2.00 | 1.78 | 1.89 | 2.13 | 2.13 | 2.29  | <b>1.88</b> | <b>0.26</b> |
|   | KE   | 1.86 | 1.84 | 1.83 | 1.87 | 1.93 | 1.93 | 1.87 | 1.89 | 1.83 | 1.84  | <b>1.87</b> | <b>0.04</b> |
| HS/4  | REIA | 2.17 | 1.95 | 1.80 | 1.92 | 1.90 | 2.37 | 2.09 | 3.26 | 2.33 | 2.31  | <b>2.21</b> | <b>0.42</b> |
|   | DIR  | 2.86 | 1.90 | 3.60 | 2.67 | 2.50 | 2.22 | 2.11 | 6.75 | 4.17 | 6.00  | <b>3.48</b> | <b>1.68</b> |
|   | KE   | 2.79 | 2.76 | 2.75 | 2.80 | 2.86 | 2.87 | 2.80 | 2.82 | 2.76 | 2.76  | <b>2.80</b> | <b>0.04</b> |

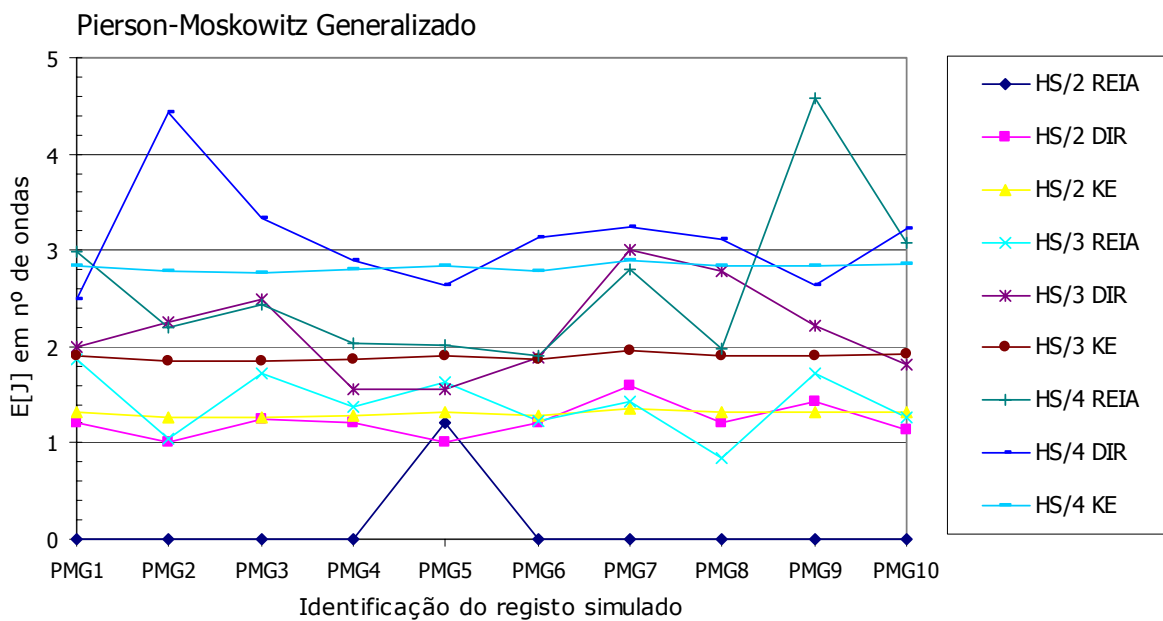


**Fig. 3-17 - Análise de  $E[J]$  para os níveis  $v = H_s/2, H_s/3$  e  $H_s/4$ , utilizando os métodos REIA, DIR e KE – Espectro P-M (ITTC)**

Finalmente, no Quadro 3-9 e na Fig. 3-18, apresentam-se as restantes 10 simulações numéricas (**PMG1** a **PMG10**), desta vez referentes a um espectro Pierson-Moskowitz generalizado (de características indicadas no Quadro 3-6), assim como os respectivos resultados.

**Quadro 3-9 - Análise de grupos de ondas em registos simulados - P-M generalizado**

| Valores de $E[J]$ para 10 registos simulados (PMG1 a PMG10) - Espectro Pierson-Moskowitz Generalizado |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |             |             |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------------|-------------|
| Nível   | Tipo | PMG1 | PMG2 | PMG3 | PMG4 | PMG5 | PMG6 | PMG7 | PMG8 | PMG9 | PMG10 | m           | dp          |
| HS/2  | REIA | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.21 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00  | <b>0.12</b> | <b>0.38</b> |
|   | DIR  | 1.20 | 1.00 | 1.25 | 1.20 | 1.00 | 1.20 | 1.60 | 1.20 | 1.43 | 1.14  | <b>1.22</b> | <b>0.18</b> |
|   | KE   | 1.31 | 1.27 | 1.27 | 1.29 | 1.31 | 1.29 | 1.35 | 1.31 | 1.31 | 1.32  | <b>1.30</b> | <b>0.02</b> |
| HS/3  | REIA | 1.87 | 1.04 | 1.72 | 1.37 | 1.63 | 1.23 | 1.42 | 0.84 | 1.72 | 1.26  | <b>1.41</b> | <b>0.33</b> |
|   | DIR  | 2.00 | 2.25 | 2.50 | 1.55 | 1.55 | 1.89 | 3.00 | 2.78 | 2.22 | 1.82  | <b>2.16</b> | <b>0.49</b> |
|   | KE   | 1.90 | 1.85 | 1.85 | 1.87 | 1.90 | 1.87 | 1.96 | 1.91 | 1.90 | 1.92  | <b>1.89</b> | <b>0.03</b> |
| HS/4  | REIA | 2.99 | 2.19 | 2.43 | 2.04 | 2.01 | 1.90 | 2.81 | 1.98 | 4.57 | 3.07  | <b>2.60</b> | <b>0.82</b> |
|   | DIR  | 2.50 | 4.43 | 3.33 | 2.90 | 2.63 | 3.13 | 3.25 | 3.11 | 2.64 | 3.22  | <b>3.11</b> | <b>0.55</b> |
|   | KE   | 2.83 | 2.78 | 2.77 | 2.80 | 2.83 | 2.79 | 2.90 | 2.84 | 2.83 | 2.85  | <b>2.82</b> | <b>0.04</b> |



**Fig. 3-18 - Análise de  $E[J]$  para os níveis  $v = H_s/2$ ,  $H_s/3$  e  $H_s/4$ , utilizando os métodos REIA, DIR e KE - Espectro P-M generalizado**

Da análise dos resultados destes três conjuntos de simulações numéricas, observa-se imediatamente que os resultados da caracterização de grupos de ondas obtidos quando se considera um nível de grupo bastante baixo ( $v = H_s/4$ ) são bastante inconsistentes, qualquer que seja o método de caracterização utilizado. Por outro lado, como já se viu atrás, para um nível de grupo mais elevado ( $v = H_s/2$ ), o método REIA não é adequado, pois fornece valores de  $E[J]$  nulos em vários registos, valores não confirmados por outros métodos, em especial pelo método de referência DIR.

Dos testes numéricos efectuados, resulta que o método que melhores resultados produz, tendo como referência o método directo, é o método de Kimura Espectral (KE). As fórmulas de Longuet-Higgins (LH), além de serem de fácil utilização, também dão resultados convincentes. Claramente, os métodos baseados na envolvente clássica (ENV) e na de Rice/Hilbert (RH e RHa) fornecem maus resultados. Também o método REIA não apresenta bons resultados quando o nível de agrupamento  $v$  é elevado, mas permite caracterizar bem os grupos de ondas para níveis  $v$  mais reduzidos.

Torna-se claro que o número de ensaios realizados é insuficiente para poder tirar mais conclusões. Há, pois, necessidade de efectuar mais testes sistemáticos, com outras combinações de parâmetros espectrais, outros tipos de espectro, etc., para se poderem extrair conclusões mais seguras, depois do que poderão ser propostos eventuais refinamentos dos métodos.

### 3.7.2 RELAÇÃO ENTRE ESPECTRO E GRUPOS DE ONDAS

Como já se referiu atrás, um conjunto de ondas cuja altura excede um certo nível tem efeitos diferentes numa estrutura marítima, conforme as ondas são seguidas ou intercaladas com outras de menor altura.

Assim, o conhecimento do espectro não é suficiente para caracterizar completamente um registo de agitação marítima. Isto resulta bem claro do exame do modelo espectral geralmente usado para a representação da elevação da superfície do mar,  $\eta(t)$ , conhecido por *modelo das fases aleatórias*, Carvalho, 1989, que será apresentado no próximo capítulo (Eq. (4-2) da Secção 4.2.3).

Na Eq. (4-2), vê-se que, para obter uma realização particular,  $\eta(t)$ , é necessário, além de especificar o espectro,  $S(f)$ , especificar também as fases,  $\phi_k$  nas  $N$  sinusóides.

Isto poderá significar que haverá registos com o mesmo espectro, uns com grupos de ondas e outros sem grupos de ondas, ou seja, que o agrupamento não depende do espectro, mas apenas das fases? O método EIA de Funke e Mansard, 1979, abordado na Secção 3.4.2, parece confirmar que é assim. Também a chamada *simulação condicionada*, Giménez *et al.*, 1990, em que se pode inserir um ou mais grupos de ondas num registo existente, sem lhe alterar o espectro (simulação numérica tratada em 4.3.3), leva a pensar o mesmo. Porém, não é isso que se depreende de trabalhos doutros autores, como, por exemplo, Vledder, 1992.

Segundo Vledder, 1992, a largura espectral está relacionada com a intensidade dos grupos de ondas. Realmente, os estados de mar caracterizados por espectros estreitos têm mais grupos de ondas do que os estados de mar de espectros mais largos (Vledder, 1992, Rye, 1974, e outros).

Também Pires Silva, 1995, evidenciou que a forma do espectro, em particular a sua largura, está relacionada com as características dos grupos de ondas, embora, segundo este autor, os parâmetros mais apropriados à sua caracterização exijam alguma discussão.

A seguir, procura-se dar uma contribuição para esclarecer este assunto, abordando-se, do ponto de vista empírico, a relação entre espectro e grupos de onda.

Assim, os Quadros 3-2 a 3-5, apresentados atrás, referentes a 15 registos simulados numericamente e 5 registos simulados em canal de ondas irregulares, mostram, para além dos resultados mencionados na secção anterior, valores dos parâmetros seguintes:

$Q_p$  - parâmetro adimensional clássico definido em Goda, 1970

$$Q_p = \frac{2 \int_0^{\infty} f S^2(f) df}{m_0^2} \quad (3-57)$$

$Q_e$  - parâmetro adimensional de Medina e Hudspeth, 1987

$$Q_e = \frac{2 m_1}{m_0^3} \int_0^{\infty} S^2(f) df \quad (3-58)$$

$\nu$  - parâmetro adimensional de Longuet-Higgins, 1984

$$\nu = \sqrt{\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1} \quad (3-59)$$

$\kappa$  - parâmetro adimensional devido a Battjes, 1974 e Battjes e Vledder, 1984, Eq. (3-26)

$r$  - aproximação devida a Battjes, 1974, do coeficiente de correlação entre alturas de onda sucessivas a partir de informação espectral, definida pela Eq. (3-28)

O significado de  $S(f)$  e  $m_n$  nas fórmulas anteriores é o seguinte:

$S(f)$  - Espectro unilateral de  $\eta(t)$ ;

$m_n$  - Momento de ordem  $n$ , Eq. (2-12).

O parâmetro  $GF$  de Funke e Mansard (1979), definido pela Eq. (3-48), não é considerado neste estudo, pelas razões apontadas na Secção 3.4.2.

Também o parâmetro  $\varepsilon$  de Cartwright e Longuet-Higgins, 1956, embora de importância teórica, não foi utilizado, devido à dificuldade prática de dele obter uma estimativa correcta, como assinalam Carvalho *et al.*, 1970. De facto, a necessidade que há em calcular o momento  $m_4$ , através da Eq. (2-12), levanta obstáculos à sua utilização, quer do ponto de vista teórico, quer do das aplicações práticas (Pires Silva, 1995).

De referir que Vledder e Battjes, 1992, e Vledder, 1992, consideram que  $Q_p$  e  $Q_e$  não são adequados para caracterizar a largura de espectro, mesmo no que diz respeito aos grupos de onda. Segundo estes autores, na estimação de espectros, estes parâmetros dão apenas uma indicação dos valores de ordenada máxima dos espectros (correspondentes à frequência de pico) e da variabilidade amostral.

Como se sabe, há uma assinalável variabilidade amostral quando se estima a densidade espectral  $S(f)$  a partir de um único registo de onda. Tal variabilidade pode ser reduzida através de alisamento, muito embora se perca resolução. No caso do cálculo de  $\nu$  e  $\kappa$ , a excentricidade (*bias*) é sempre reduzida, mesmo quando há muito alisamento (no caso de  $\kappa$ , os termos em seno e cosseno variam lentamente comparados com  $S(f)$ ). Contudo,  $Q_p$  e  $Q_e$  são proporcionais ao integral do quadrado de  $S(f)$ . Como tal, a variabilidade amostral em  $S(f)$  provoca uma excentricidade positiva na estimação de  $Q_p$  e  $Q_e$ .

Vledder, 1992, mostrou que tanto  $\nu$  como  $\kappa$  não sofrem excentricidade assinalável à medida que o alisamento aumenta, ao passo que os outros sofrem excentricidades fortes. Em Vledder, 1992, foi também avaliado qual o efeito da variação do limite superior de integração na determinação dos parâmetros. Utilizando um espectro de JONSWAP, verificou-se que o parâmetro mais estável é  $\kappa$  se a frequência de corte,  $f_c$ , for pelo menos dupla da de pico,  $f_p$ ; o parâmetro  $\nu$  cresce sempre, mesmo para valores de  $f_c/f_p = 4$ ;  $Q_e$  e  $Q_p$  comportam-se de forma semelhante a  $\kappa$ , embora estabilizem mais perto de  $f_c/f_p = 2.5$ .

A duração dos registos influencia também a variabilidade na estimação dos parâmetros. Nelson, 1987, e Medina e Hudspeth, 1990, consideram que quanto maiores os registos, melhor. A maior dificuldade é prática. Também, Nakamura, 1996, chama a atenção para o facto de se dever utilizar registos da natureza com mais de 60 min para uma caracterização mais fiável dos grupos de ondas.

Por outro lado, Battjes e Vledder, 1984, Stam, 1988, e Masson e Chandler, 1993, indicam que o coeficiente de correlação entre alturas de onda calculado através do espectro é consistentemente inferior ao mesmo coeficiente calculado directamente do registo temporal.

Stam, 1988 considera que isso acontece porque o processo estocástico considerado é gaussiano, o espectro é estreito e as amplitudes de onda são consideradas como sendo metade das alturas de onda. Este autor considera também que:

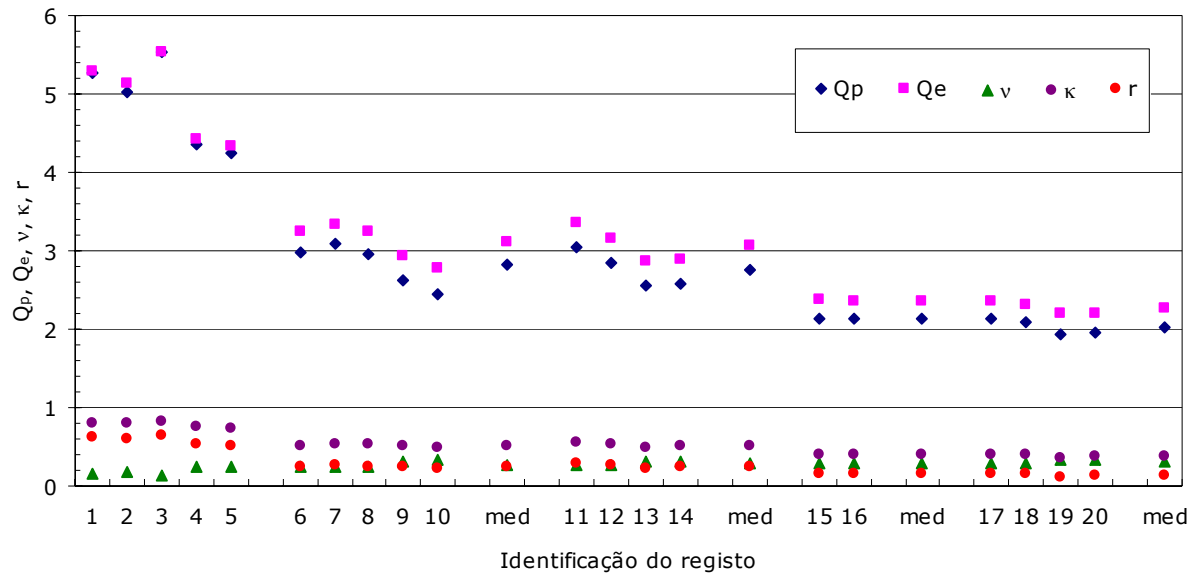
- A variabilidade estatística distorce as relações entre os parâmetros analisados
- É necessário usar registos longos
- $Q_p$ ,  $Q_e$  e  $\nu$  não são adequados como parâmetros espectrais
- O parâmetro  $\kappa$  é bom para relacionar grupos de ondas com formas espectrais
- O parâmetro  $\kappa$  não é sensível ao maior ou menor alisamento do espectro e, no seu cálculo, o limite superior de integração não é importante

Em conclusão, parece que os parâmetros  $Q_p$ ,  $Q_e$  e  $\nu$  não são do agrado destes autores, enquanto  $\kappa$  é por eles considerado um bom parâmetro de agrupamento de ondas.

Sobre este tema apresentam-se a seguir as conclusões obtidas no âmbito do presente trabalho.

Na Fig. 3-19 pode ver-se a forma como os parâmetros espectrais variam com o registo considerado (Quadro 3-1).

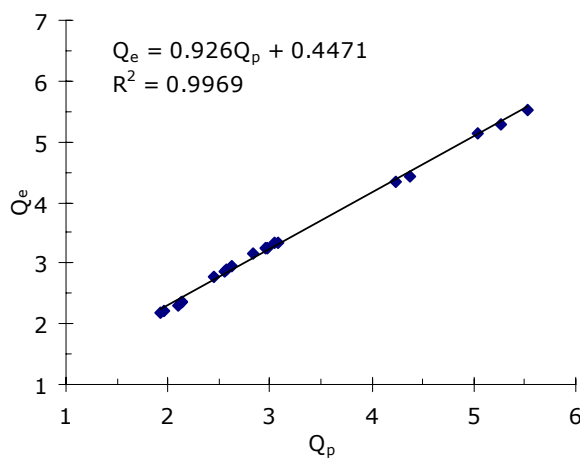
Nesta figura, após cada conjunto de registos simulados (6 a 10, simulados com as características dos registos do canal (1 a 5); 11 a 14, simulados com espectro JONSWAP; 15 e 16, simulados com espectro Pierson-Moskowitz ITTC e, finalmente, 17 a 20, simulados com espectro Pierson-Moskowitz generalizado), apresenta-se o correspondente valor médio do parâmetro (med).



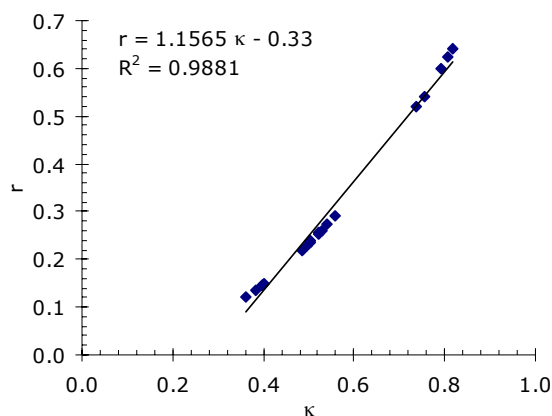
**Fig. 3-19 - Comparação dos parâmetros espectrais dos registos considerados**

Um aspecto que ressalta da Fig. 3-19 é que os parâmetros dependem da forma do espectro, uma vez que os registos simulados com o espectro de JONSWAP (11 a 14), mais estreito, fornecem parâmetros definidores de maior agrupamento de ondas do que os registos simulados com o espectro de Pierson-Moskowitz (15 a 20).

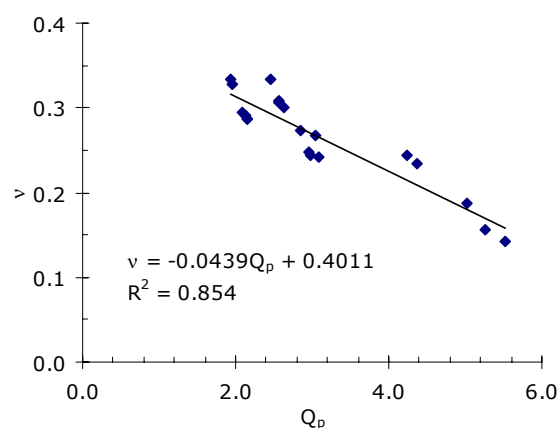
Por outro lado, verificam-se as seguintes relações mostradas nas Figs. 3-20 a 3-22.



**Fig. 3-20 - Relações entre diferentes parâmetros espectrais – Relação  $Q_p$ - $Q_e$**



**Fig. 3-21 - Relações entre diferentes parâmetros espectrais – Relação  $\kappa$ - $r$**



**Fig. 3-22 - Relações entre diferentes parâmetros espectrais – Relação  $Q_p$ - $\nu$**

Verifica-se que, para as combinações de parâmetros consideradas, estes estão bastante relacionados entre si, isto é, por exemplo, a valores elevados do coeficiente de correlação entre ondas sucessivas,  $r$ , correspondem valores elevados para os restantes parâmetros e um valor baixo de  $\nu$ .

Assim, no que respeita às relações entre parâmetros consideradas neste estudo, pode concluir-se que há uma relação praticamente linear entre todos os parâmetros considerados dois a dois, embora, como se disse, não tenha sido verificada essa relação com todos os pares possíveis.

Por outro lado, verifica-se que o comportamento dos parâmetros espectrais está, em média, directamente relacionado com o comportamento dos valores de  $E[J]$  e, conseqüentemente, com  $E[G]$  e  $E[N_G]$ .

O facto de a parâmetros espectrais elevados corresponderem valores médios da duração de grupos de ondas também elevados<sup>8</sup> pode ser apreciado em todos os registos analisados, o que, por si, po-

<sup>8</sup> O parâmetro  $\nu$  tem o efeito contrário.

derá significar que nestes registos o espectro determina a existência de mais ou menos grupos de ondas.

Estes resultados estão de acordo com Nakamura, 1996. Este autor apresenta também uma fórmula de previsão do coeficiente de correlação entre ondas sucessivas,  $r$ , com base num conjunto de parâmetros determinados a partir de registos da natureza. Esta fórmula não parece, contudo, ter qualquer utilidade uma vez que os parâmetros são calculados com base no próprio registo, do qual se poderia calcular directamente o próprio coeficiente  $r$ .

Em Yu e Liu, 1990, são analisados, em termos de parâmetros caracterizadores de grupos de onda, 73 registos de onda reais. Os resultados obtidos, após a determinação de todas as alturas de onda dos registos e o cálculo dos parâmetros relativos às que superam o nível  $v$  pré-determinado, são comparados com os obtidos teoricamente, utilizando o método EIA, o método dos chorrilhos e o método Kimura Espectral.

Da comparação dos parâmetros de grupo, por análise discreta, verifica-se o seguinte (Yu e Liu, 1990):

- O método que se aproxima mais (bastante até!) do método directo é o de Kimura Espectral.

Esta conclusão confirma os resultados a que se chegou neste trabalho.

- Da comparação com os valores obtidos pelo método directo, conclui-se que a teoria da envolvente é inadequada pois subestima aproximadamente em  $2/3$  os valores observados.

Yu e Liu, 1990, não apresentam quaisquer razões que expliquem este facto. No entanto, visto que também neste trabalho se chegou a essa conclusão, considera-se razoável admitir que essa diferença reside no facto de certas excursões acima do nível  $v$  serem consideradas, para efeitos de cálculo da média de  $J$ , quando nesse período de tempo não há onda alguma. Verificou-se, do estudo efectuado, que a função envolvente do sinal, tal como é calculada (através da TH), não é suficientemente "suave" por forma a evitar picos estreitos, que, embora ultrapassando o nível  $v$  (e, por isso, contando para o cálculo), não contêm quaisquer ondas.

- A teoria clássica dos chorrilhos também subestima em muito os valores de número de ondas, pois neste método as ondas são consideradas independentes.

Ora, já se verificou atrás (Secção 3.3.1) que, na realidade, ondas sucessivas são dependentes, uma vez que, em geral, uma onda alta é precedida de uma outra quase da mesma altura e a seguinte também o é. A teoria de Kimura introduziu esta correlação entre ondas sucessivas.

Com base nos mesmos 73 registos reais, Yu e Liu, 1990, testaram relações entre o que chamam *factores de agrupamento de ondas* (*factors of wave groupiness*).



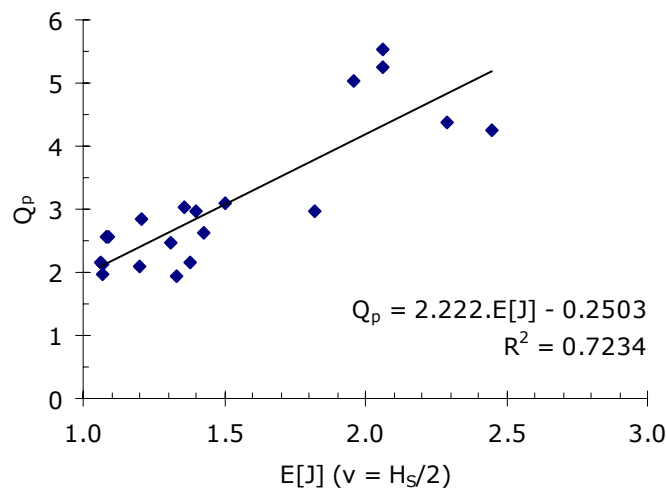
Assim, analisaram, entre outras, as seguintes relações:

- $E[J]$  com  $GF$  – verifica-se que não há correlação alguma (nuvem de pontos).
- $E[G]$  com  $GF$  - idem.
- $r$  com  $Q_p$  - reduzida correlação linear(?).
- $GF$  com  $Q_p$  – alguma correlação, linear, o que não surpreende pois no cálculo dos dois entram parâmetros comuns (momentos).
- $Q_p$  com  $\kappa$  - razoável correlação linear (a melhor de todas as apresentadas).
- $GF$  e  $\kappa$  - não há correlação nenhuma (recorda-se que  $GF$  é o factor de agrupamento de Funke e Mansard – Eq. (3-48))

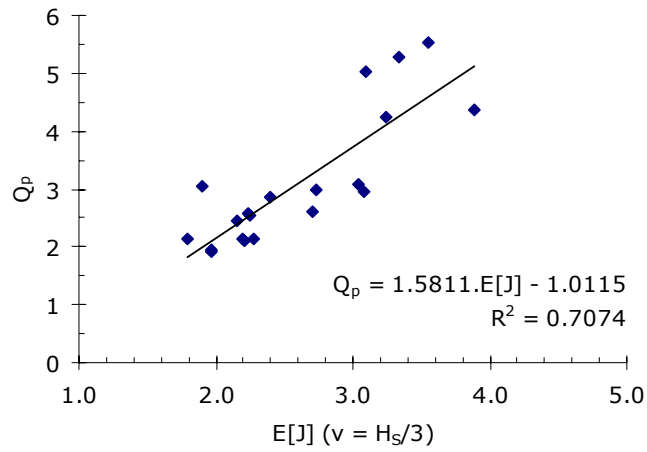
Com base nestas relações, os autores concluem: “All factors (...) are evidently correlated to GF (...). It means that GF is the main factor for representing the wave groupiness”.

No entanto, ressalta da leitura deste artigo que, por um lado, visualmente não se detecta, como se disse acima, correlação entre as variáveis mencionadas e, por outro lado, no mesmo ano da publicação do artigo de Yu e Liu, Medina e Hudspeth, 1990, demonstraram que  $GF$  deveria ser sempre igual a 1, independentemente de haver ou não grupos de ondas; ou seja, concluíram que  $GF$  não serve para caracterizar os grupos de onda, sendo certo que alguns desvios de 1 que  $GF$  possa apresentar decorrem de instabilidades numéricas.

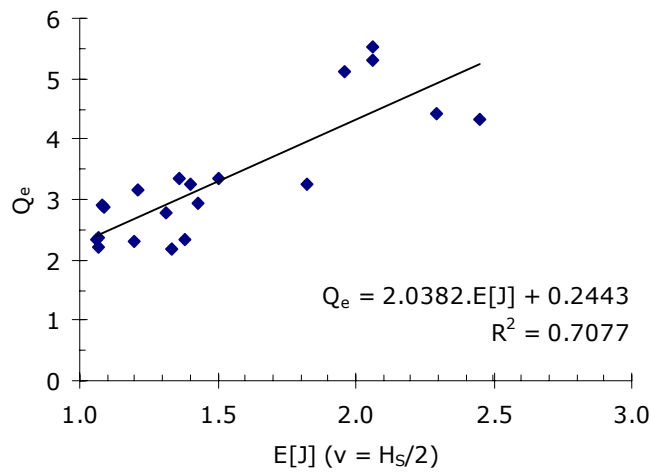
Neste trabalho procurou-se determinar as relações entre o número médio de ondas por grupo de determinado nível  $v$  ( $H_S/2$  e  $H_S/3$ ) e os diferentes parâmetros espectrais. Essas relações, obtidas com os dados disponíveis, são ilustradas da Fig. 3-23 à Fig. 3-32.



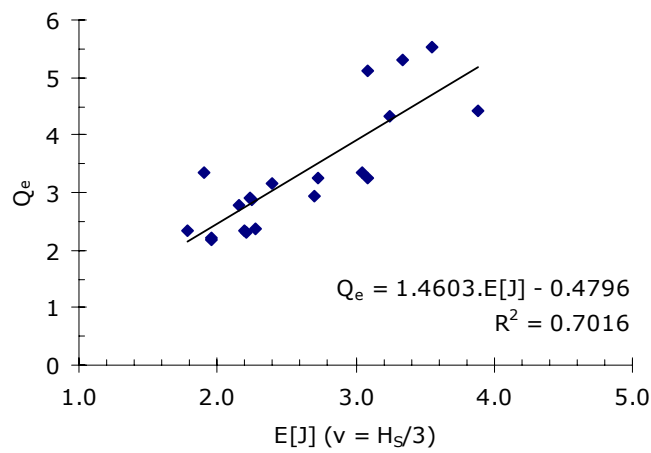
**Fig. 3-23 - Relações entre  $E[J]$  e  $Q_p$  - Nível  $H_S/2$**



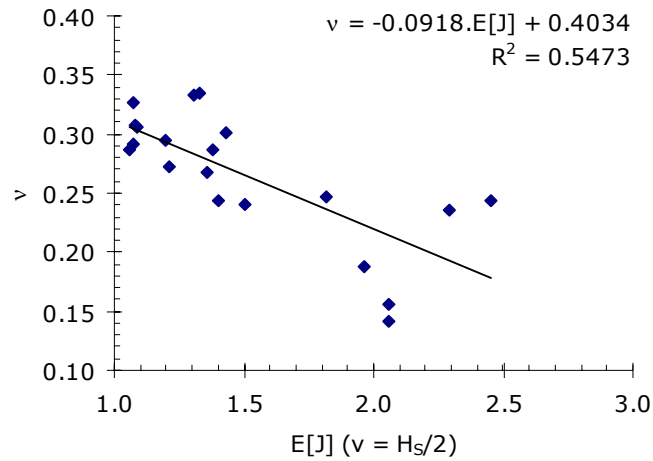
**Fig. 3-24 - Relações entre  $E[J]$  e  $Q_p$  - Nível  $H_s/3$**



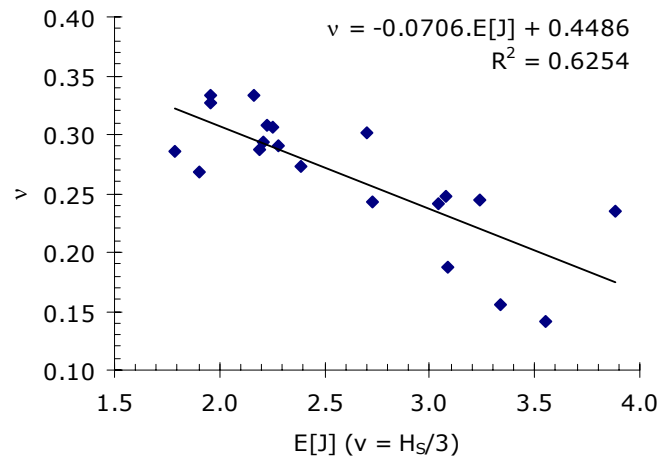
**Fig. 3-25 - Relações entre  $E[J]$  e  $Q_e$  - Nível  $H_s/2$**



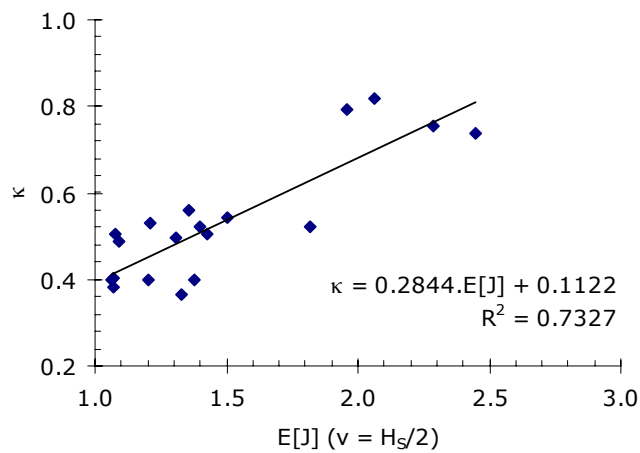
**Fig. 3-26 - Relações entre  $E[J]$  e  $Q_e$  - Nível  $H_s/3$**



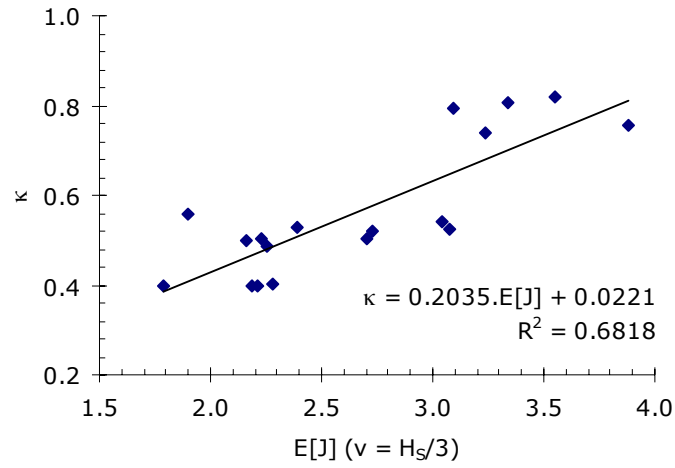
**Fig. 3-27 - Relações entre E[J] e ν - Nível H<sub>s</sub>/2**



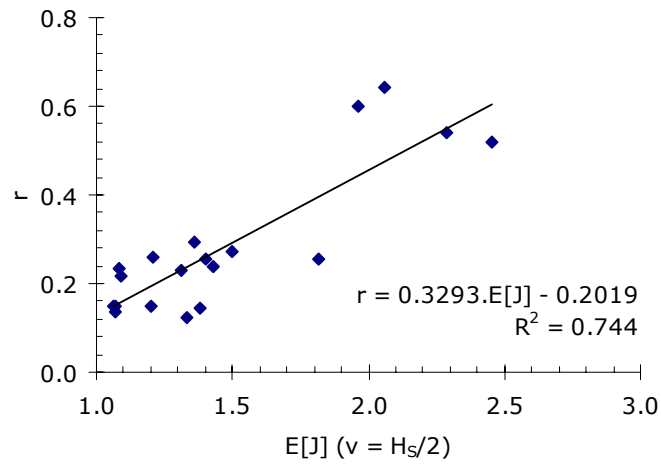
**Fig. 3-28 - Relações entre E[J] e ν - Nível H<sub>s</sub>/3**



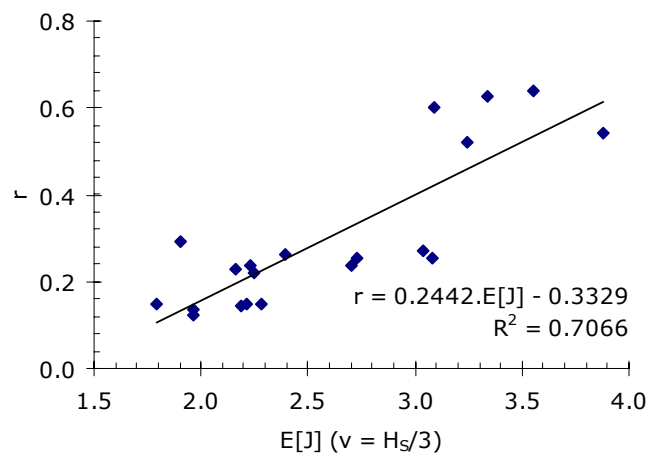
**Fig. 3-29 - Relações entre E[J] e κ - Nível H<sub>s</sub>/2**



**Fig. 3-30 - Relações entre  $E[J]$  e  $\kappa$  - Nível  $H_s/3$**



**Fig. 3-31 - Relações entre  $E[J]$  e  $r$  - Nível  $H_s/2$**



**Fig. 3-32 - Relações entre  $E[J]$  e  $r$  - Nível  $H_s/3$**

Da análise global das Figs. 3-23 a 3-32, verifica-se que há uma correlação ligeiramente melhor entre  $E[J]$  e os parâmetros espectrais para o nível  $v = H_s/2$ .

Para qualquer dos níveis, as correlações são razoáveis e por isso pode dizer-se que, em média, todos os parâmetros espectrais dão uma razoável indicação da presença de grupos de ondas no registo, sendo que, nos casos analisados,  $\kappa$  e  $r$  dão a melhor indicação, atendendo ao valor do coeficiente de determinação,  $R^2$ , e são portanto os parâmetros espectrais mais adequados deste ponto de vista.

O exame das Figs. 3-23 a 3-32 permite talvez concluir que a *relação espectro - grupos de ondas* é significativa mas não absoluta, deixando margem para a manipulação das fases. Isto significa que, para uma mesma forma do espectro poderão obter-se registos com mais ou menos grupos de ondas com escolha adequada das fases, isto é, verifica-se que para um mesmo conjunto de parâmetros espectrais podem obter-se valores de  $E[J]$  muito diferentes consoante o registo considerado; conclui-se, assim, não existir uma relação perfeita, embora ela seja significativa *em média*.

Deste modo, embora em média, esta relação seja válida, ela não é necessária, para um dado registo. *Na verdade, a largura do espectro determina apenas a relação entre o número de cristas e o número de zeros ascendentes (ou descendentes)*, como se conclui, a partir da definição e significado do parâmetro  $\varepsilon$  de Cartwright e Longuet-Higgins, 1956. Para um espectro muito estreito, estes números são praticamente iguais, o que equivale a uma grande regularidade dos registos, a qual, na prática, implica existência de grupos de ondas.

Aliás, do modelo estocástico de base da superfície do mar (modelo das fases aleatórias) que se apresenta no próximo capítulo, Eq. (4-2), podem, segundo Funke e Mansard, 1979, obter-se registos com o mesmo espectro e com maior ou menor agrupamento de ondas, mediante adequada manipulação das fases a usar. O mesmo efeito se pode obter através da chamada *simulação condicionada*, Giménez *et al.*, 1990, tratada no próximo capítulo, na Secção 4.3.3.

O que se deve reter é que os registos possíveis com dado espectro têm, em média, características de agrupamento de ondas determinadas por esse espectro; mas isso não significa que um dado registo, gerado a partir desse espectro, tenha necessariamente essas características. Para o garantir, há que manipular as fases.

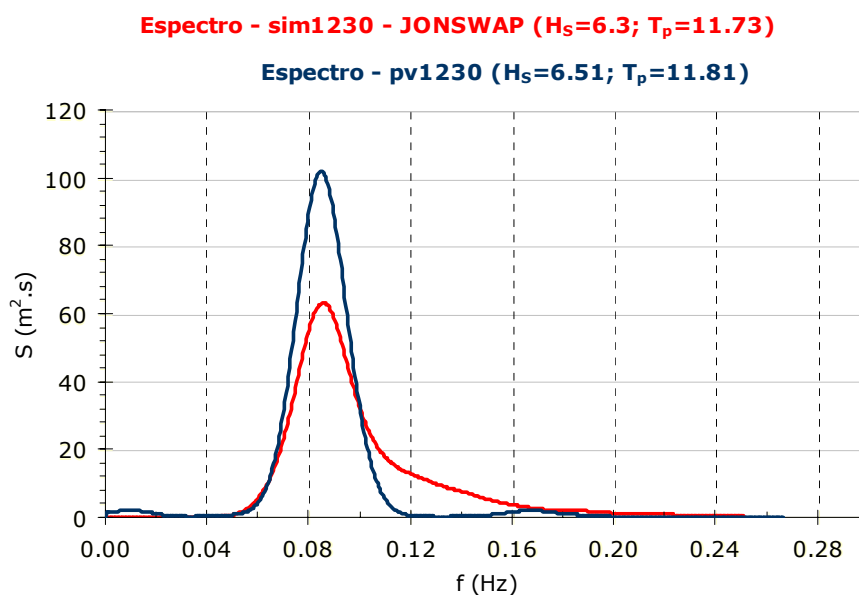
### 3.7.3 REGISTOS EM CANAL VS. REGISTOS SIMULADOS NUMERICAMENTE

Embora de carácter diferente, um outro aspecto que se pode retirar da análise dos resultados mostrados nos Quadros 3-2 a 3-5 é o de que os registos em canal apresentam maior agrupamento de ondas que os registos simulados numericamente, considerando que os espectros dos registos simulados são idênticos aos fornecidos ao programa de geração de ondas irregulares que comanda o batedor de ondas do canal.

Uma análise visual dos registos faz, logo à partida, suspeitar que os registos vindos do canal têm uma maior regularidade, com alturas de onda mais correlacionadas e, conseqüentemente, com pa-

râmetros espectrais e valores médios de grupos de ondas superiores aos dos registos simulados. Na verdade, da análise espectral dos sinais do canal, verifica-se que o espectro efectivamente obtido no canal se afasta significativamente do espectro inicialmente fornecido ao programa que gera o sinal a fornecer ao batedor de ondas.

Na Fig. 3-33 pode comparar-se o espectro JONSWAP calculado de um sinal simulado numericamente (de nome *sim1230*) com o espectro calculado a partir de um registo correspondente obtido no canal de ondas irregulares do LNEC (de nome *pv1230*).



**Fig. 3-33 - Comparação dos espectros dos registos simulado e em canal**

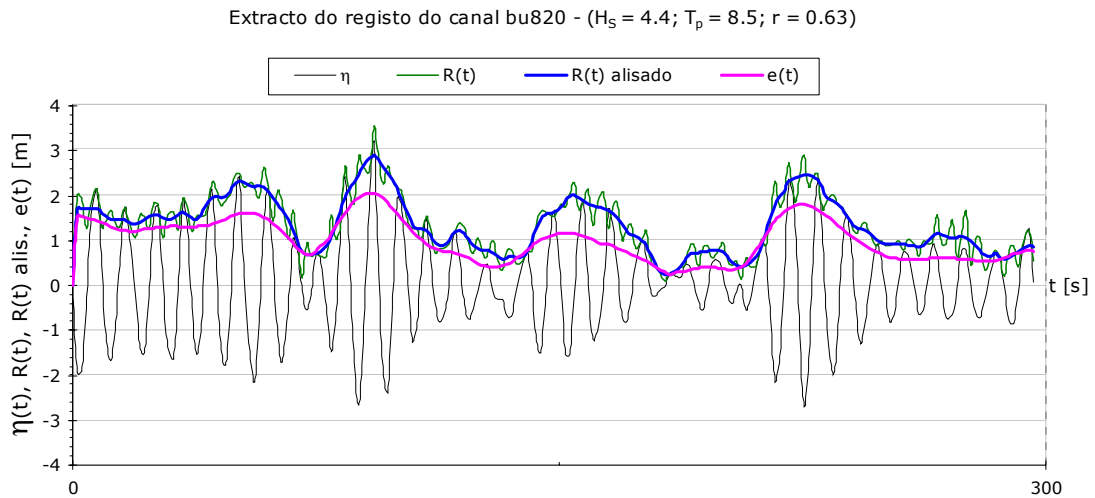
De referir que o espectro apresentado a encarnado (do sinal simulado) é idêntico ao inicialmente introduzido no programa de geração de ondas irregulares no canal, que, por sua vez, originou um sinal com o espectro (obtido) a azul. Conclui-se, portanto, que há dificuldade em gerar rigorosamente no canal um sinal com certas características espectrais. Tal dificuldade poderá estar relacionada com a presença de reflexões e re-reflexões dentro do canal.

O problema das reflexões é tratado no **Capítulo 5 - Simulação e Modelação Física de Agitação Marítima**, Secção 5.4.

A diferença dos espectros dos sinais do canal e simulado mostrada na Fig. 3-33 explica por que, tanto os parâmetros espectrais, como os valores médios de ondas por grupo, têm valores superiores no canal. Realmente, o espectro no canal, apesar de ter a mesma energia  $m_0$  que o espectro simulado, apresenta-se bastante mais estreito, o que, suspeita-se, determina um maior agrupamento de ondas.

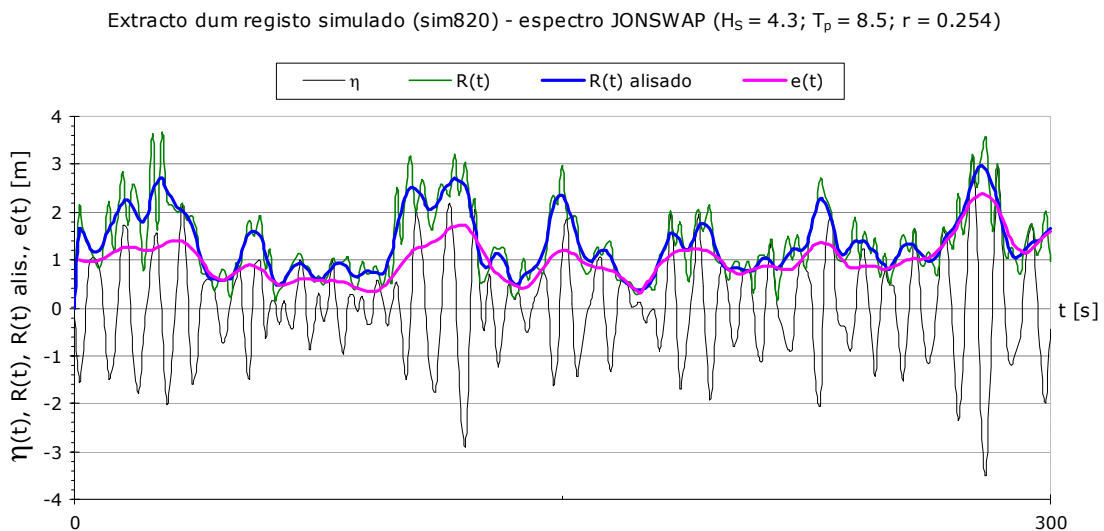
Este maior agrupamento de ondas é mais facilmente visível ao observar-se o gráfico dos respectivos registos. Nas Figs. 3-34 e 3-35, apresentam-se extractos de dois sinais,  $\eta$ , do mesmo tipo, o primeiro (*bu820*) obtido num canal de ondas irregulares e o segundo (*sim820*) simulado numeri-

camente, assim como as respectivas funções envolventes,  $R(t)$ , " $R(t)$  alisado" e  $e(t)$ , correspondentes aos métodos RH, RHa, e REIA, respectivamente.



**Fig. 3-34 - Extracto de um registo em canal (registo bu820)**

Os resultados da análise do programa AGRUPA sobre estes registos podem ser consultados nos Quadros 3-2 e 3-3: são, respectivamente, os correspondentes ao registo nº 1 e ao registo nº 6.



**Fig. 3-35 - Extracto de um registo simulado (registo sim820) com características idênticas às do registo da figura anterior**

Imediatamente, por observação visual, nota-se o maior agrupamento de ondas no primeiro extracto de registo, o que provém do canal. De salientar também melhores envolventes (RHa e REIA) no caso do registo do canal.

#### 3.7.4 NOTA FINAL

Como comentário final sobre esta secção, note-se que para uma determinação mais rigorosa da envolvente RH, seria desejável encontrar uma melhor forma de calcular a transformada de Hilbert (TH). Isso passará, por exemplo, pela implementação de procedimentos de cálculo da TH através do uso do filtro sugerido por McClellan *et al.*, 1979.

Por outro lado, na determinação da função envolvente pelos métodos REIA e RHa, foram utilizadas janelas temporais para o cálculo do alisamento por médias móveis de diferentes características de largura. No primeiro método, seguiu-se a recomendação de Funke e Mansard, 1979, isto é, utilizou-se uma janela temporal de Bartlett (triangular) de largura  $T_p$ . Para o alisamento da envolvente RH, achou-se que a janela poderia ser a mesma e considerou-se que a sua largura deveria ser inferior à da envolvente REIA, a partir da análise visual da envolvente não alisada. Utilizou-se, assim, uma largura de  $T_p/2$ . Este parâmetro foi simplesmente arbitrado e poderá acontecer não ser o mais adequado.

### 3.8 CONCLUSÕES

Apresentaram-se neste capítulo vários métodos de caracterização directa e indirecta dos grupos de ondas a partir de propriedades gerais dos registos, susceptíveis de associação a efeitos em obras marítimas.

Seguiram-se duas vias para o tratamento teórico dos grupos de ondas: através da abordagem da caracterização dos grupos de ondas numa perspectiva discreta, mediante a utilização das séries de alturas de onda dos registos, com o *método dos chorrilhos* (MC), o *método de Kimura* (MK) e o *método de Kimura Espectral* (KE), ou através da abordagem da mesma caracterização segundo um ponto de vista contínuo, usando a noção de envolvente das ondas, com os *métodos da envolvente clássica* (ENV) e de Rice/Hilbert (RH e RHa), com as *fórmulas de Longuet-Higgins* (LH) e com os *métodos EIA e REIA* (EIA e REIA).

O método dos chorrilhos foi, logo de início, rejeitado, por considerar as alturas de onda sucessivas independentes. Por outro lado, fez-se uma adaptação do método de EIA de Funke e Mansard, 1979, que consistiu em tomar não a fórmula que estes apresentaram, mas antes a sua raiz quadrada, a função REIA.

A utilização do programa de computador **AGRUPA**, numa fase inicial do trabalho, e dos módulos **SAM MOD 9-4 (Caracterização de Grupos de Onda)** e **SAM MOD 9-3 (Detecção de Cristas em Registos)** do pacote de *software* incluído nesta dissertação, numa fase posterior, permitiu obter parâmetros espectrais ( $Q_p$ ,  $Q_e$ ,  $\nu$  e  $\kappa$  - ver definições em 3.7.2, pág. 67) e outras características dos grupos de ondas.

A comparação dos métodos acima mencionados foi estabelecida a partir da análise dos resultados, relativos quer aos valores médios do número de ondas dos grupos,  $E[J]$  (e a outros, tais como  $E[G]$  e  $E[N_G]$ ), quer aos parâmetros espectrais, e foi concretizada através da análise de vários registos



do onda, reais (vindos de observações de uma sonda do canal de ondas irregulares) e simulados em computador. Para essa comparação, considerou-se como método de referência o *método directo* (cálculo directo dos valores a partir dos registos), tido como o mais correcto.

Tanto no caso dos registos reais como no caso dos registos simulados, os resultados dos cálculos numéricos obtidos neste capítulo permitiram separar os métodos em três grupos, para além do método directo (DIR):

- **Métodos que utilizam a envolvente de Rice/Hilbert, RH** - com parâmetros de agrupamento de ondas nítida e sistematicamente inferiores aos do método directo.
- **Métodos LH e KE** - com parâmetros de agrupamento de ondas idênticos aos do método directo.
- **Métodos igualmente baseados no conceito de envolvente mas aos quais foi necessário aplicar algum tipo de alisamento, REIA e RHa** - mais incertos por força da arbitrariedade das características do alisamento utilizado e, em geral, também inferiores aos do método directo. A envolvente produzida pelo método REIA é, em particular, incapaz de identificar grupos de ondas quando o nível  $v$  é elevado (por exemplo, para  $H_S/2$ ).

Estes resultados possibilitaram, assim, eleger os métodos LH e KE como os mais adequados. Concluiu-se também, serem de rejeitar os métodos RH, RHa e REIA.

Confirma-se, por outro lado, que há uma relação bastante forte entre os parâmetros espectrais estudados ( $Q_p$ ,  $Q_e$ ,  $v$  e  $\kappa$ ), que nalguns casos é praticamente linear, e que o comportamento destes reflecte-se, em média, nos registos analisados, em igual comportamento dos parâmetros  $E[J]$ ,  $E[G]$  e  $E[N_G]$ . Assim, nos registos analisados, o espectro determina a existência de mais ou menos grupos de ondas. No entanto, a relação espectro - grupos de ondas, apesar de ser significativa, não é absoluta, dando possibilidades de manipular as características de agrupamento de ondas através das fases. O parâmetro  $GF$  de Funke e Mansard, 1979, não foi considerado desde início pelas razões oportunamente apontadas.

Do estudo da distribuição das durações dos grupos de ondas obtidos pelo método directo, verificou-se que a distribuição geométrica é adequada para modelar as durações dos grupos de ondas do ponto de vista discreto, sendo o modelo exponencial, com ou sem parâmetro de localização, apropriado para o ponto de vista contínuo, nas condições em que ele foi abordado; isto é, como mera transposição do número de ondas para duração contínua, por multiplicação pelo período médio de onda.



# CAPÍTULO 4 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE AGITAÇÃO MARÍTIMA

---

## 4.1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho, entende-se por *simulação numérica* de agitação marítima a produção de um *registo* ou *senal* digitalizado das elevações da superfície da água,  $\eta(t)$ , com certas características estatísticas. Estas características poderão ser fornecidas quer através da *especificação do espectro* (métodos apresentados na Secção 4.2), quer pela *especificação do espectro e de uma dada característica de agrupamento de ondas* (métodos apresentados na Secção 4.3).

Os registos assim obtidos terão aplicação prática imediata na simulação física, em canal ou tanque de ondas irregulares. A simulação física será tratada no próximo capítulo.

## 4.2 SIMULAÇÃO POR ESPECIFICAÇÃO DO ESPECTRO

Nesta secção abordam-se os métodos de simulação/geração numérica, em computador, de registos de onda,  $\eta(t)$ , através da pré-especificação de um espectro de variância. Neste âmbito, são abordados três métodos que permitem a simulação numérica de registos de onda com um dado espectro: o *método de filtragem digital de ruído branco*, no domínio do tempo (Secção 4.2.1); os métodos baseados em modelos auto-regressivos e/ou médias móveis - AR, MA e ARMA - chamados *métodos paramétricos* (Secção 4.2.2), e os *métodos de sobreposição linear de sinusóides*, os mais utilizados (Secção 4.2.3). Existe ainda um outro método, desenvolvido por Vanhoff, Elgar e Guza, 1997, que possibilita a simulação numérica de séries temporais não gaussianas, o qual não é considerado neste trabalho, dadas as suas condições muito especiais de aplicação.

O método de filtragem digital de ruído branco baseia-se na utilização de *ruído branco discreto*, isto é, um PE discreto estacionário, com valor médio nulo e espectro de variância constante (Carvalho, 1973). O método pressupõe a aplicação de um filtro linear no domínio do tempo àquele ruído, por forma a que a série temporal que daí resulte tenha a densidade espectral desejada. Trata-se, assim, de moldar o ruído branco através de um filtro ou filtros.

Os métodos paramétricos (AR, MA e ARMA) utilizam certos modelos cujos parâmetros são determinados com base em séries temporais dadas. Nestes métodos, o espectro é tido em conta apenas indirectamente.

Os métodos de sobreposição linear de sinusóides são técnicas onde se considera a sobreposição de diversas componentes harmónicas com amplitudes calculadas a partir de um dado espectro, real ou empírico. Os métodos DSA (*Deterministic Spectrum Amplitudes*) e NSA (*Non-deterministic Spectrum Amplitudes*) são os mais conhecidos dos métodos de sobreposição existentes.

O método DSA, ou, o que é o mesmo, o *Método das Fases Aleatórias*, MFA (ver Eq. (4-2), mais à frente nesta Secção), é sem dúvida o mais utilizado e o usado quer ao longo deste trabalho, quer no pacote de *software* SAM. O método NSA é semelhante ao método MFA, mas com as amplitudes também aleatórias.

Em Yim e Lai, 1996, são utilizadas medições da natureza e simulações numéricas de elevações da superfície, sendo estas obtidas através da utilização dos modelos DSA e NSA, descritos em Tuah e Hudspeth, 1982, com a adição de um termo de correcção relativo às não linearidades dado por Duncan e Drake, 1995.

Yim e Lai, 1996, verificaram a validade dos dois modelos acima referidos (DSA e NSA), uma vez que as alturas de onda (ZUC), obtidas por simulação numérica utilizando ambos os métodos, obedeciam à esperada distribuição de Rayleigh. Verificaram, também, que as elevações da superfície da água eram aproximadamente modeladas pela também esperada distribuição Normal, e melhor com estes modelos do que com a utilização de dados da natureza.

Um outro método de simulação numérica, o *método de Vanhoff, Elgar e Guza*, 1997, possibilita a geração de séries temporais não gaussianas (*non-Gaussian or quadratically nonlinear time series*) com base num espectro especificado - que fornece as amplitudes - e num *bi-espectro* (*bispectrum*) - que fornece as fases. Estes autores concluíram que, em águas pouco profundas, os métodos clássicos de simulação numérica (o MFA, por exemplo) não são a melhor solução. Esta conclusão provém da comparação entre parâmetros estatísticos obtidos de simulações com aquele modelo e de observações reais. No que diz respeito a grupos de ondas, Vanhoff, Elgar e Guza, 1997, verificaram que, em águas pouco profundas, os parâmetros de agrupamento de ondas também são mais correctos quando se utilizam simulações não gaussianas e que, nestas circunstâncias, o número de ondas dos grupos de ondas aumenta por via das interacções quadráticas não-lineares. Assim, verifica-se que, à medida que aumentam as não linearidades, aumenta também o número de ondas dos grupos de ondas. Isto acontece em águas pouco profundas; no caso de águas médias e profundas, as estatísticas de grupos de ondas estão de acordo com um mar gaussiano e, portanto, o método MFA é adequado.

Visto que há bastantes textos onde estes métodos estão descritos com algum pormenor (ver, por exemplo, Carvalho, 1973, 1990; Rodríguez, 1995, ou Pires Silva, 1995), dá-se a seguir apenas uma breve descrição de cada um dos dois primeiros métodos (método da filtragem digital de ruído branco e métodos paramétricos) e apresenta-se mais pormenorizadamente o método das fases aleatórias, MFA, visto que é esse o utilizado ao longo deste trabalho.

#### 4.2.1 MÉTODO DA FILTRAGEM DIGITAL DE RUÍDO BRANCO

Uma vez que o método da filtragem digital de ruído branco é actualmente muito pouco usado, apresentam-se dele apenas alguns tópicos gerais, a seguir. O método da filtragem digital faz uso da teoria de sistemas lineares, tratada na Secção 2.5.

Na prática, o método da filtragem digital de ruído branco desenvolve-se nas seguintes etapas (Carvalho, 1990):

1. Pretende-se obter um sinal  $y(t)$  com um dado espectro unilateral,  $S_y(f)$ , com  $f \in (0, +\infty)$ ;
2. Determina-se o espectro bilateral,  $p_y(f)$ , sendo, assim,  $p_y(f)$  definido em  $(-\infty, +\infty)$ ;

$$p_y(f) = S_y(f)/2$$

3. Produz-se um sinal,  $x(t)$ , de ruído branco (isto é, uma realização de um PE com valor médio nulo e espectro de variância constante, Carvalho, 1973), a partir de um espectro de variância  $p_x(f) = 1$ , ao longo das frequências de interesse;

4. Calcula-se, utilizando a Eq. (2-25),

$$h(t) = TF^{-1} \left[ \sqrt{\frac{p_y(f)}{p_x(f)}} \right] = TF^{-1} \left[ \sqrt{p_y(f)} \right], \text{ com } f \in (-\infty, +\infty),$$

5. Determina-se o sinal pretendido,  $y(t)$ , com espectro  $S_y(f)$ , utilizando a Eq. (2-21), que aqui se reproduz:

$$y(t) = h(t) \otimes x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - \tau) x(\tau) d\tau \quad (4-1)$$

Mais pormenores relativos aos métodos de cálculo numérico podem ser encontrados em Carvalho, 1973 e 1990. Como se disse, este método não será usado neste trabalho.

#### 4.2.2 MÉTODOS PARAMÉTRICOS

Os métodos AR, MA e ARMA usam como modelos de representação da superfície da água processos estocásticos (PE) lineares para aproximar o processo subjacente ao sinal e o ajuste do modelo aos dados observados, ou seja, a identificação de parâmetros (Carratalá, 1995), e daí a designação de *métodos paramétricos*.

Contrariamente aos restantes modelos aqui tratados, estes não usam directamente um dado espectro, mas sim um modelo que depende de um conjunto de coeficientes. Estes coeficientes são então utilizados como parâmetros da fórmula empírica, que é basicamente um filtro digital linear aplicado a um dado sinal inicial, geralmente ruído branco. Como se disse, este tipo de métodos não será abordado neste trabalho, pelo que se dispensam mais pormenores. Também estes métodos são abordados com elevada profundidade em Carvalho, 1973.

#### 4.2.3 MÉTODO DAS FASES ALEATÓRIAS

Pretende-se, com o *método das fases aleatórias*, MFA, gerar numericamente um sinal  $\eta(t)$ , representação da elevação da superfície do mar num dado ponto, com dado espectro  $S(f)$ . Este espectro pode ser previamente especificado, quer através de um conjunto de ordenadas ao longo das frequências de interesse, quer através de parâmetros característicos referentes a um dado tipo de espectro empírico (ver **Anexo 2 - Definição de Espectros Empíricos**).

O *modelo das fases aleatórias*, o qual foi desenvolvido a partir da representação espectral dos processos estocásticos (Cramér e Leadbetter, 1969, Carvalho, 1981), é dado pela expressão a seguir:

$$\eta(t) = \sum_{k=1}^{\infty} s_k \sin(2\pi f_k t + \phi_k) \approx \sum_{k=1}^N \sqrt{2S(f_k)\Delta f} \sin(2\pi f_k t + \phi_k) \quad (4-2)$$

sendo:

- $N$  - o número de sinusóides consideradas na definição do espectro;
- $s_k$  - a amplitude correspondente à frequência  $k$ ;
- $f_k$  - a frequência para cada sinusóide  $k$ , com um valor aleatório dentro de cada intervalo  $\Delta f_k$ , isto é, o que se obtém de uma variável aleatória uniformemente distribuída entre  $k.\Delta f$  e  $(k+1).\Delta f$ ;
- $\phi_k$  - a fase correspondente à sinusóide  $k$ , tomando valores independentes uns dos outros de uma variável aleatória uniformemente distribuída entre  $0$  e  $2\pi$ ;
- $S(f)$  - o espectro unilateral.

Este modelo, já referido em 3.2, permite gerar um sinal  $\eta(t)$  com base unicamente num dado espectro,  $S(f)$

Embora surjam frequentemente na literatura métodos complexos de simulação não-linear (Rodríguez, 1995), métodos ditos mais rigorosos, considera-se que o MFA satisfaz perfeitamente as exigências da Engenharia Civil e tem a vantagem de ser fácil de manusear. Por estas razões, o método que se empregará daqui em diante neste trabalho será o MFA.

Uma vez que é este o método de simulação numérica adoptado neste trabalho, dão-se a seguir pormenores referentes à sua construção. Assim,

1. Obtêm-se as amplitudes,  $s_k = \sqrt{2S(f_k)\Delta f}$ , por consideração do espectro dado  $S(f)$ , em  $k$  pontos ao longo do eixo das frequências, sendo que, para evitar a construção de sinais periódicos, as frequências correspondentes a cada sinusóide  $k$  devem ser tomadas em posições aleatórias (por exemplo, com distribuição uniforme) dentro de cada intervalo  $\Delta f_k$ ;
2. As fases  $\phi_k$  são obtidas, para cada frequência da sinusóide  $k$ , tomando valores independentes de uma variável aleatória uniformemente distribuída entre  $0$  e  $2\pi$ ;
3. Para cada instante  $t_i = i.\Delta t$ , determina-se a elevação da superfície  $\eta(t)$  correspondente através da utilização da Eq. (4-2).

Foi elaborado um programa, codificado em  $G$ , no módulo **SAM MOD 1-1 (Simulação Base Espectro)**, que permite a determinação de registos numéricos simulados com um dado espectro através do método MFA. Este módulo está incluído no pacote de *software SAM*, descrito no **Capítulo 6 - Software de Simulação Numérica e Física**.

Pode ver-se na Fig. 4-1 um exemplo de aplicação deste módulo. Nesta figura podem observar-se o registo numérico simulado (a branco, no gráfico de cima) e os espectros pretendido e obtido (respectivamente, a amarelo e a branco, no gráfico de baixo).

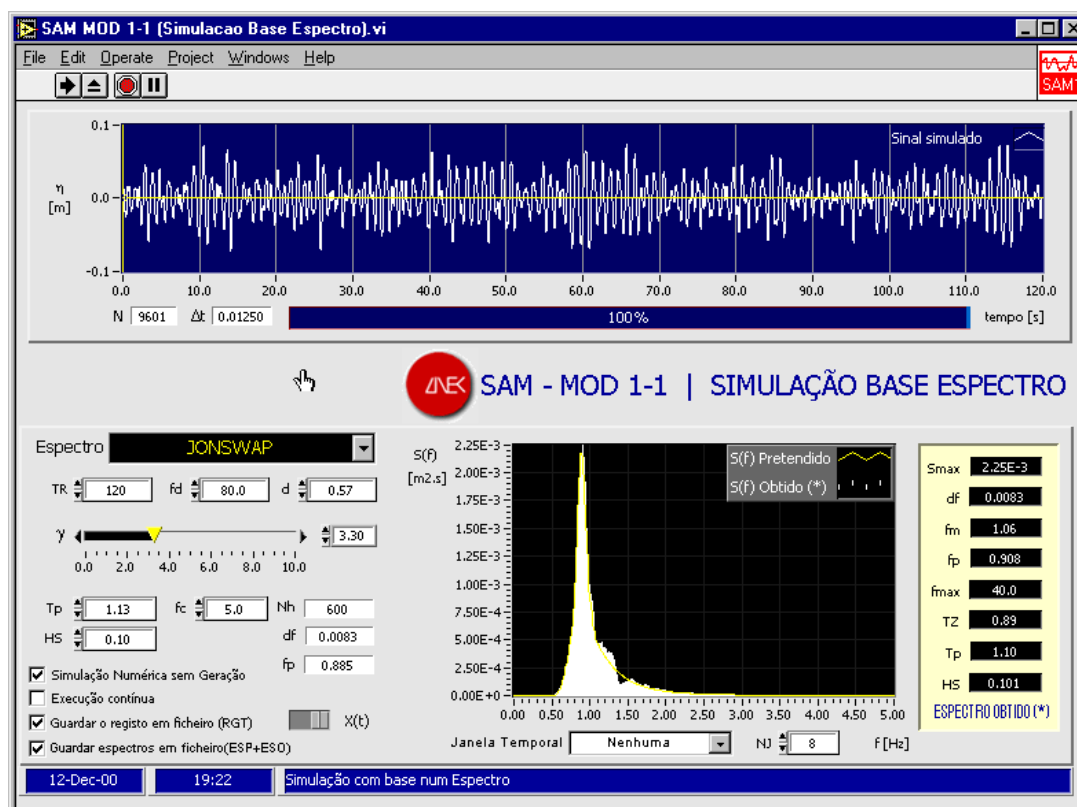


Fig. 4-1 - Exemplo de aplicação do programa SAM MOD 1-1 (Simulação Base Espectro)

### 4.3 SIMULAÇÃO POR ESPECIFICAÇÃO DO ESPECTRO E DO AGRUPAMENTO DE ONDAS

Há também, como se referiu atrás, todo o interesse em desenvolver métodos de simulação numérica e física de registos de onda com um dado espectro e uma dada característica de agrupamento de ondas, a empregar nos ensaios correntes em modelo físico, para permitir uma melhor representação da realidade em ambiente laboratorial.

Nas próximas três secções, apresenta-se igual número de tipos de métodos numéricos de simulação de registos  $\eta(t)$ , através da especificação do espectro e de uma função envolvente (Secção 4.3.1), de um espectro e das fases obtidas de um registo de ondas dado (Secção 4.3.2), e da simulação condicionada (Secção 4.3.3). São também apresentados alguns comentários aos programas de cálculo automático **FASESPE** e **SIMCOND**, o primeiro dos quais foi posteriormente implementado no pacote **SAM**.

Já atrás, no **Capítulo 3 - Caracterização de Grupos de Ondas**, se definiu *grupo de ondas* (de nível  $v$ ) como um conjunto de ondas sucessivas cujas cristas estão acima de um nível,  $v$ , pré-estabelecido, e se realçou a importância de considerar a existência de grupos de ondas no dimensionamento de obras marítimas; com efeito, por um lado, uma sucessão de ondas de grande altura é mais prejudicial à estabilidade destas obras que a ocorrência das mesmas ondas intervaladas com outras de menor altura (Johnson *et al.*, 1978) e, por outro lado, as *ondas longas ligadas* que estão associadas aos grupos de ondas podem eventualmente provocar ressonância muito perniciosa aos sistemas navio-amarras.

Aborda-se a seguir o problema da simulação de grupos de ondas em computador; resta o mesmo problema mas no âmbito da simulação física, em canal de ondas irregulares, assunto a tratar no **Capítulo 5 - Simulação e Modelação Física de Agitação Marítima**.

Os programas de cálculo automático usados nesta secção, e realizados propositadamente para a presente dissertação de doutoramento, foram os programas **FASESPE** e **SIMCOND**, sendo que o primeiro se encontra actualmente integrado no pacote de *software* **SAM**, também este realizado em linguagem *G* no âmbito do presente trabalho. Está previsto fazer o mesmo para o programa **SIMCOND** em data oportuna.

#### 4.3.1 ESPECIFICAÇÃO DO AGRUPAMENTO ATRAVÉS DA ENVOLVENTE

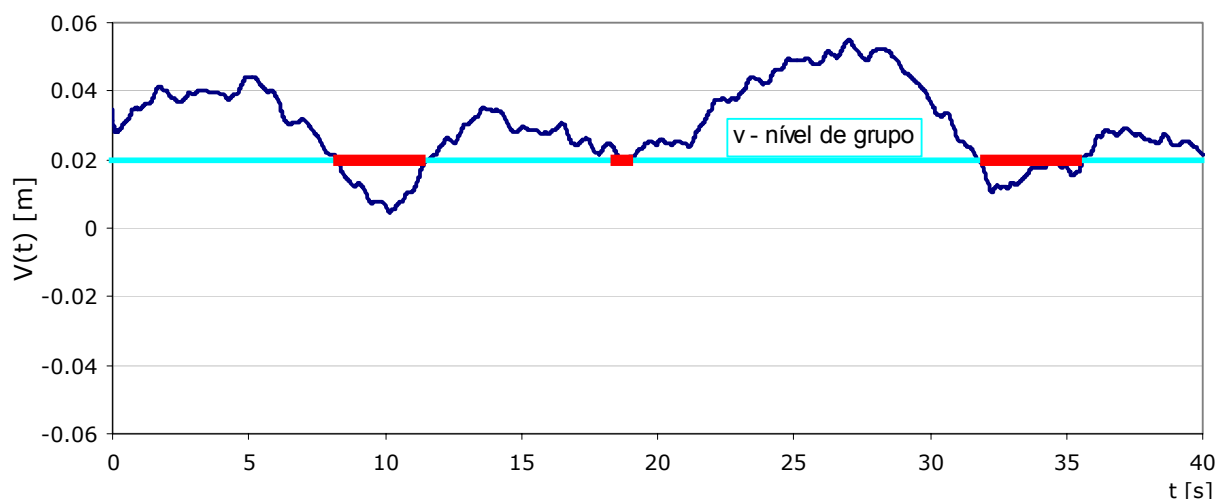
A seguir, apresentam-se dois métodos de simulação numérica da agitação por especificação do espectro e do agrupamento de ondas, baseados no conceito de envolvente: o *método iterativo REIA* (Secção 4.3.1.1), adequadamente adaptado do trabalho de Funke e Mansard, 1979, tendo em vista a sua utilização em ensaios físicos, e o *método da escalagem*, ME (Secção 4.3.1.2), desenvolvido no âmbito deste trabalho de doutoramento.



## 4.3.1.1 O MÉTODO ITERATIVO REIA

O método iterativo REIA é uma adaptação do método EIA/SIWEH de Funke e Mansard, 1979 (Secção 3.4.2), para a simulação de registos com dado espectro e dadas características de grupos de ondas, que se propõe neste trabalho. Este método consiste num algoritmo que implementa as etapas preconizadas por Funke e Mansard, 1979, mas que, em vez de utilizar a função EIA/SIWEH,  $E(t)$ , Eq. (3-47), utiliza uma função envolvente qualquer, que pode ser, por exemplo, a envolvente REIA,  $e(t)$ , Eq. (3-49), ou a envolvente de Rice-Hilbert,  $R(t)$ , Eq. (3-43), com ou sem alisamento<sup>9</sup>.

O objectivo do método iterativo REIA é, portanto, construir um sinal ou registo,  $\eta(t)$ , com dado espectro,  $S(f)$ , e com grupos de ondas definidos por uma certa envolvente. A envolvente utilizada, qualquer que seja, ( $e(t)$ ,  $R(t)$ , com ou sem alisamento, etc.) será de agora em diante genericamente designada por  $V(t)$ . Na Fig. 4-2 mostra-se, como exemplo, um extracto de 40 s de uma envolvente com duração total de 300 s, do tipo Rice/Hilbert (RH), Eq. (3-43), que vai servir de base à explicação do presente método. A linha horizontal, a azul claro, representa o nível de grupo considerado,  $v = 0.02$  m. Os intervalos de tempo durante os quais o nível  $v$  é superior à envolvente considerada estão representados a encarnado.



**Fig. 4-2 - Extracto de uma envolvente,  $V(t)$ , com a forma dos grupos de ondas de nível  $v$  pretendidos**

Antes de se apresentar o método proposto, fortemente baseado no método iterativo de Funke e Mansard, 1979, como se disse, convirá notar o seguinte:

- Uma vez que os períodos das ondas de menor altura são menores que os das ondas de maior altura, a frequência do registo nas zonas fora dos grupos de ondas é maior – intervalos representados a encarnado na Fig. 4-2.

<sup>9</sup> O alisamento (*smoothing*) possibilita a obtenção de uma função mais suave, com menos oscilações.

- A frequência nas zonas das ondas maiores, isto é, dentro dos grupos de ondas, corresponde à frequência da zona de maior energia do espectro, ou seja, a frequência na zona dos grupos de ondas corresponde à frequência de pico do espectro,  $f_p$  – intervalos a azul claro na Fig. 4-2.
- Considera-se, pelo menos de início, que as maiores frequências do registo (nas zonas onde não há grupos de ondas) são da ordem de 6 vezes a frequência de pico, como é recomendado por Funke e Mansard, 1979.

Com base nestes pontos, para a construção de  $\eta(t)$  seguir-se-ão os seguintes passos:

- 1** Constrói-se uma sinusóide de amplitude unitária e de frequência modulada,  $x(t)$ , isto é, uma "sinusóide" em que a frequência varia com o tempo, de modo igual ao que se pretende no sinal final,  $\eta(t)$ , a gerar.

Assim, considere-se o sinal  $x(t)$ , de amplitude unitária e frequência modulada. Este sinal, apesar de manter a sua amplitude, sofre uma variação de frequência ao longo do tempo que poderá ser ditada pelo critério, atrás assinalado, de que ondas de maior altura deverão ter maiores períodos ou, o que é o mesmo, menores frequências.

A forma de  $x(t)$  poderá ser então dada por

$$x(t) = \sin [2\pi [f_p + f_o(t)] t] \quad (4-3)$$

sendo

$$f_o(t) = k(t) \cdot f_p \quad (4-4)$$

e  $f_p$  a frequência de pico do espectro  $S(f)$ .

Deste modo, a frequência de pico do espectro  $S(f)$ , é a menor frequência do sinal  $x(t)$ .

Assim,  $f_o(t)$  deverá ser definido de tal modo que tome o valor 0 nas secções de  $x(t)$  que têm grupos de ondas (onde há maiores alturas de onda) e aumente, com a diminuição de  $V(t)$ , até um valor máximo de  $m \cdot f_p$ , nas secções onde não há grupos de ondas (onde as alturas de onda são menores).

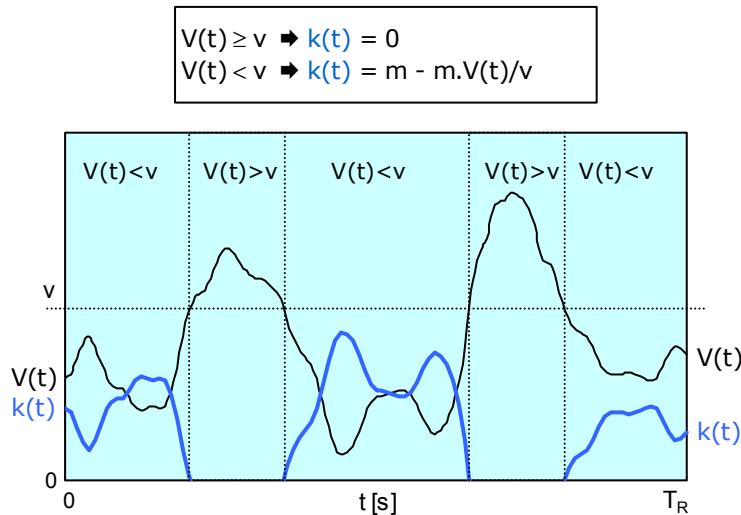
O valor de  $m$  poderá ser à volta de 5 – este é, aliás, o valor recomendado por Funke e Mansard, 1979. Portanto,

$$0 < k(t) < m \quad (4-5)$$

com  $k(t)$  crescente desde um ponto em que a envolvente desça abaixo do nível  $v [k(t) = 0]$  até ao mínimo da envolvente entre dois grupos de ondas (no limite, quando a envolvente for 0,  $k(t) = m$ ) e depois decrescente até ao começo do grupo de ondas seguinte, altura em que retoma o valor  $k(t) = 0$  (Fig. 4-3).

Nesta figura,  $k(t)$  é dado, de acordo com o que se estabeleceu atrás, por

$$\begin{cases} k(t) = 0 & \text{se } V(t) \geq v & (4-6) \\ k(t) = \frac{m}{v}(v - V(t)) & \text{se } V(t) < v & (4-7) \end{cases}$$



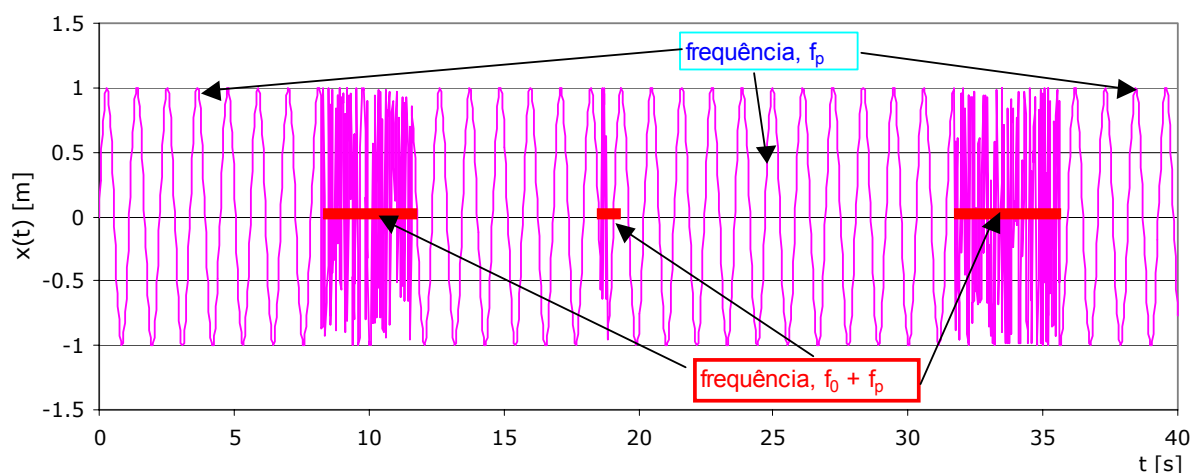
**Fig. 4-3 - Definição da função  $k(t)$**

Assim,  $k(t)$  tem um andamento constante de valor nulo quando a envolvente  $V(t)$  “envolve” um grupo de ondas, ao passo que fora destes intervalos toma um andamento simétrico do andamento da envolvente, tendo, neste caso, como valor máximo  $k(t) = m$  quando  $V(t) = 0$ .

Esta é uma das muitas definições possíveis de  $k(t)$ . Uma outra definição que pode ser adoptada é, por exemplo, a de considerar que, no intervalo entre dois grupos de ondas,  $k(t)$  tem a forma de um triângulo, de vértices definidos, com referência ao eixo do tempo, pelo início e final do grupo de ondas e pelo seu mínimo. No presente trabalho adoptou-se a primeira definição.

Na Fig. 4-4 apresenta-se um sinal  $x(t)$  calculado através da utilização do programa **FASESPE**<sup>10</sup>, considerando as frequências fornecidas pela envolvente RH mostrada na Fig. 4-2. Pretende-se que  $x(t)$  contenha, na devida ordem, as frequências que hão-de observar-se no futuro sinal  $\eta(t)$ .

<sup>10</sup> Programa inicialmente escrito em código Turbo Pascal 6.0, mais tarde convertido em linguagem gráfica “G” - ver **Capítulo 6 - Software de Simulação Numérica e Física** - Este programa, ligeiramente modificado no que diz respeito às saídas gráficas, faz agora parte do Módulo “SAM MOD 1-2 Simulação Base Espectro+GO.vi”, descrito no **Anexo 6 - Lista de Módulos e Rotinas SAM**.

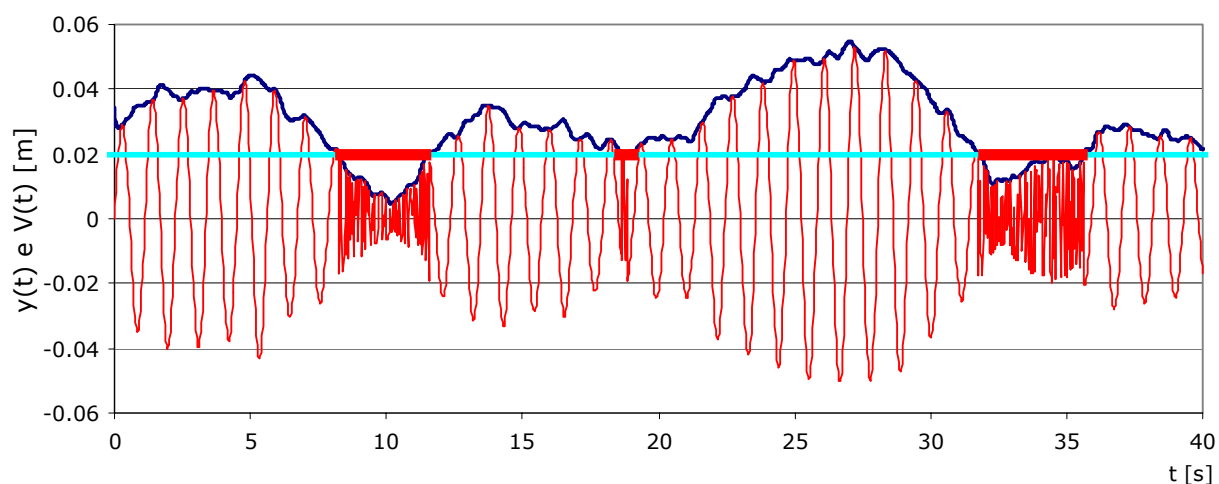


**Fig. 4-4** - "Sinusóide",  $x(t)$ , de amplitude unitária e frequência modulada de acordo com a forma dos grupos de ondas de nível  $v$  pretendidos

- 2 Transforma-se a sinusóide de frequência modulada e amplitude unitária,  $x(t)$ , numa "sinusóide" de frequência e amplitude moduladas,  $y(t)$ , dada por

$$y(t) = V(t) x(t) \quad (4-8)$$

onde  $V(t)$  é a envolvente de  $x(t)$ , com as mesmas dimensões de  $x(t)$ , por exemplo calculada de acordo com o método RH ou com o método REIA. Obtém-se, deste modo, considerando a envolvente  $V(t)$  da Fig. 4-2 e a "sinusóide"  $x(t)$  da Fig. 4-4, algo como indica a Fig. 4-5.



**Fig. 4-5** - "Sinusóide",  $y(t)$ , de frequência e amplitude moduladas de acordo com os grupos de ondas de nível  $v$  pretendidos

O sinal  $y(t)$  tem não só as frequências que se pretendem, mas também uma variação relativa de amplitudes de acordo com a função envolvente. Falta apenas que essas amplitudes correspondam ao espectro que se pretende.

- 3** Mediante uma análise harmónica de  $y(t)$ , Eq. (4-8), isto é, mediante o cálculo dos pares  $(s_k, \phi_k)$  das  $N$  sinusóides, escreve-se esta função na forma:

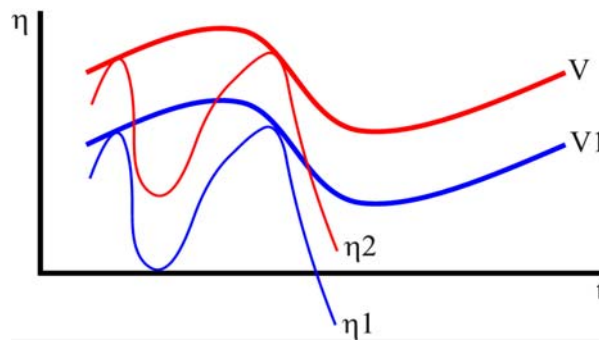
$$y(t) = \sum_{k=1}^N s_k \sin\left(2\pi \frac{k}{T_R} t + \phi_k\right) \quad (4-9)$$

- 4** Para obter uma primeira aproximação de  $\eta(t)$ , basta substituir  $s_k$  pelos valores calculados a partir de  $S(f)$ , de modo que o registo tenha o espectro  $S(f)$ :

$$\eta_1(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2S\left(\frac{k}{T_R}\right)\Delta f} \cdot \sin\left(2\pi \frac{k}{T_R} t + \phi_k\right) \quad (4-10)$$

O índice 1 em  $\eta_1(t)$  indica que se trata da primeira aproximação. Em princípio, este registo terá, além do espectro  $S(f)$ , grupos de ondas como os indicados na envolvente.

Notar, no entanto, que ao fazer a substituição pelos valores  $s_k$ , dados por  $\sqrt{2S(f_k)\Delta f}$ , altera-se um pouco a envolvente: a envolvente de  $\eta_1(t)$  é, não  $V(t)$ , mas  $V_1(t)$ . Há, porém, a possibilidade de melhorar os resultados através de iteração.



**Fig. 4-6 - Esquema para a iteração de  $\eta(t)$**

Para isso, notar (Fig. 4-6) que, se  $\eta_2(t)$  tiver a envolvente pretendida,  $V(t)$ , virá

$$\frac{\eta_2(t)}{V(t)} = \frac{\eta_1(t)}{V_1(t)} \quad (4-11)$$

o que fornece uma fórmula para iteração:

$$\eta_2(t) = \eta_1(t) \frac{V(t)}{V_1(t)} \quad (4-12)$$

**5** Cálculo da envolvente  $V_1(t)$  de  $\eta_1(t)$ .

**6** Cálculo do sinal corrigido

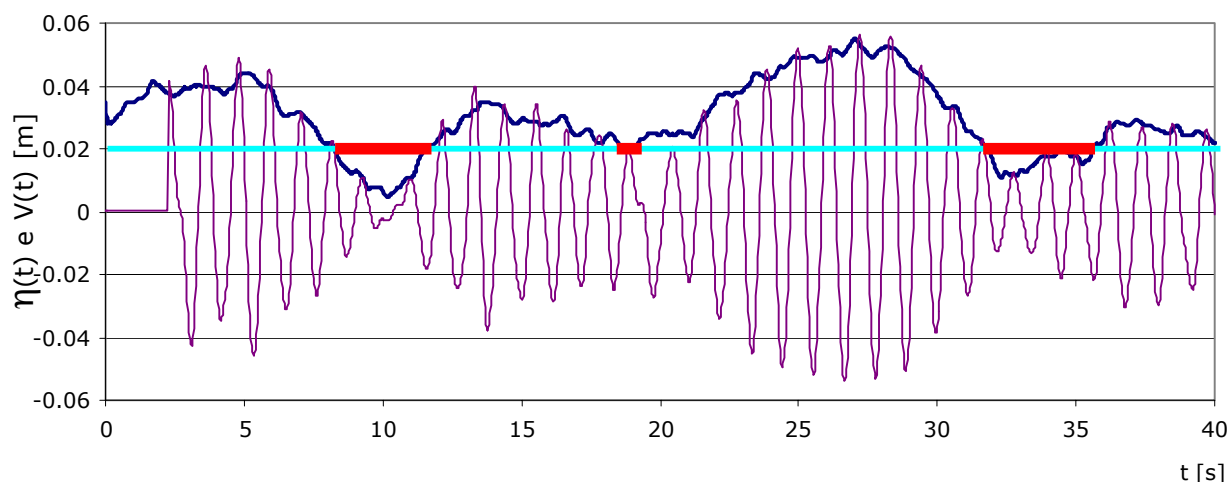
$$\eta_2(t) = \eta_1(t) \frac{V(t)}{V_1(t)} \quad (4-13)$$

**7** Fazer

$$y(t) = \eta_2(t) \quad (4-14)$$

e voltar ao passo **3**.

Na Fig. 4-7 mostra-se parte do sinal,  $\eta(t)$ , a que se chegou após três iterações, correspondente ao exemplo que se tem vindo a seguir (Figs. 4-2, 4-4 e 4-5). Note-se que, no caso em análise, se utilizou uma envolvente tipo RH, mas o procedimento é totalmente idêntico para qualquer outro tipo de envolvente. Repare-se também no facto de o sinal  $\eta(t)$  só começar a ser definido após o instante  $2T_p = 2 \times 1.13 = 2.26$  s, e terminar também 2.26 s (não mostrado na Fig. 4-7) antes do final da envolvente RH inicial. Tal deve-se ao facto de o método REIA utilizar, como se referiu em 3.4.3, uma janela temporal de alisamento de largura  $2T_p$ , sendo  $T_p = 1/f_p$ , e  $f_p$  a frequência de pico.



**Fig. 4-7 - Extracto do sinal,  $\eta(t)$ , obtido após 3 iterações do método iterativo REIA, e correspondente à envolvente pretendida,  $V(t)$**

Os resultados que deram origem às figuras deste exemplo foram produzidos utilizando o já mencionado programa de computador, **FASESPE**. Como se disse, este programa encontra-se actualmente integrado no pacote de *software* **SAM** (ver nota de rodapé <sup>10</sup>).

## 4.3.1.2 MÉTODO DA ESCALAGEM

INTRODUÇÃO

Apresenta-se a seguir um método totalmente desenvolvido no âmbito deste trabalho, que se designará por *Método da Escalagem*, ME. Este método utiliza como dados um espectro,  $S(f)$ , uma envolvente qualquer,  $V(t)$ , e um valor de  $E[D]$  (ou  $E[J]$ ) pretendido para um certo nível de agrupamento,  $\nu$ . Como se disse, a relação da Eq. (3-1) permite transformar  $E[D]$  em  $E[J]$ , ao conhecer-se  $T_z$ , o que é possível conhecendo-se  $S(f)$ .

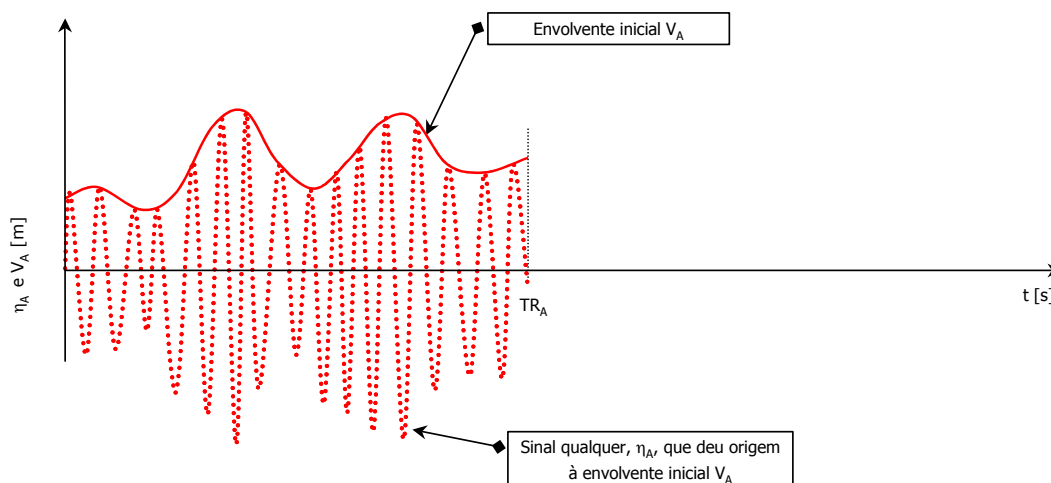
O ME é composto por duas etapas: uma primeira em que se procede à *escalagem* da envolvente dada, o que fornece uma *envolvente escalada* com o valor de  $E[D]$  (ou  $E[J]$ ) pretendido, e uma segunda em que se utiliza o método iterativo REIA (descrito em 4.3.1.1) para determinar um novo registo cuja envolvente é a envolvente escalada.

Escalar a envolvente, significa simplesmente modificar a escala do eixo temporal da função envolvente dada, de modo que o seu  $E[D]$  seja o pretendido. Posteriormente, é determinado o registo numérico adequado a esta envolvente escalada, através da utilização do método iterativo REIA.

Uma explicação mais detalhada do ME é apresentada a seguir (Fig. 4-8 à Fig. 4-13).

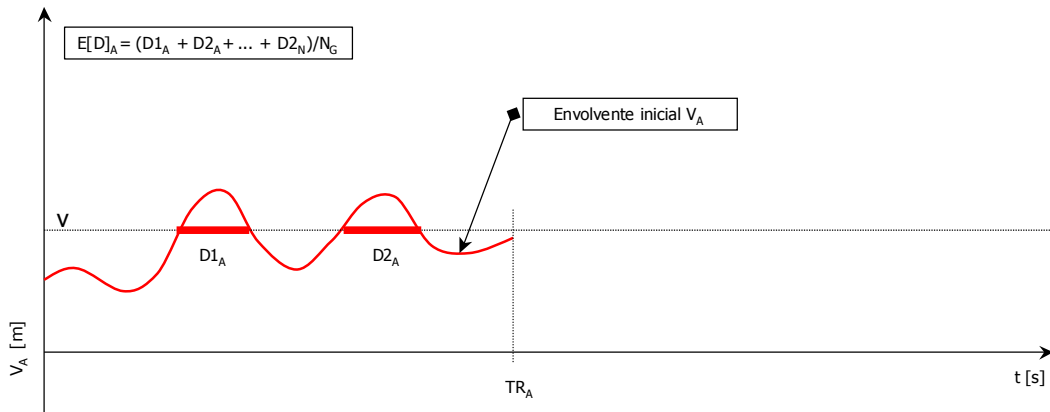
ILUSTRAÇÃO DETALHADA DO MÉTODO DA ESCALAGEM

Como se disse, o ME parte de uma função envolvente qualquer,  $V(t)$ . No entanto, para melhor ilustrar o método, no exemplo que se vai seguir, essa envolvente, designada por  $V_A(t)$ , foi obtida a partir de um registo de onda,  $\eta_A(t)$ , que se mostra na Fig. 4-8.



**Fig. 4-8 - Exemplo de um sinal qualquer,  $\eta_A(t)$ , de espectro  $S(f)$**

Na Fig. 4-9, apresenta-se somente a envolvente dada  $V_A(t)$ , que, neste exemplo, é a envolvente de  $\eta_A(t)$ , da Fig. 4-8. Na Fig. 4-9, está também assinalado o nível de agrupamento  $\nu$ , para permitir o cálculo de  $E[D]$  de  $V_A(t)$ , designado por  $E[D]_A$ .



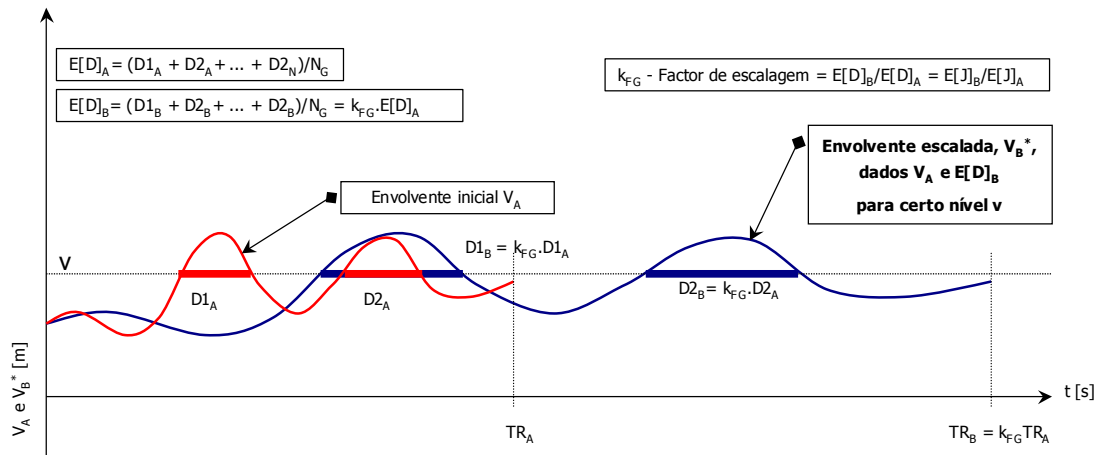
**Fig. 4-9 - Envolvente  $V_A(t)$ . Definição do nível  $v$  e cálculo de  $E[D]_A$**

Suponha-se agora que se pretende um novo sinal simulado,  $\eta_B(t)$ , com valor  $E[D]_B \neq E[D]_A$ .<sup>11</sup>

Mantendo a forma da envolvente  $V_A(t)$  da Fig. 4-9, modifica-se a escala do eixo temporal de  $V_A(t)$  com o factor de escalagem,  $k_{FG}$ .

$$k_{FG} = \frac{E[D]_B}{E[D]_A} = \frac{E[J]_B}{E[J]_A} \quad (4-15)$$

Este procedimento de *escalagem* transforma a envolvente dada,  $V_A(t)$ , numa *envolvente escalada*,  $V_B^*(t)$ . Assim,  $V_B^*(t)$  terá precisamente a mesma forma da envolvente inicial,  $V_A(t)$ , mas a sua duração será agora  $TR_B = k_{FG} \cdot TR_A$ , sendo  $TR_A$  a duração de  $V_A(t)$  - Fig. 4-10. Nesta figura, pode ver-se  $V_B^*(t)$  escalada de acordo com o factor  $k_{FG} = 2$ .



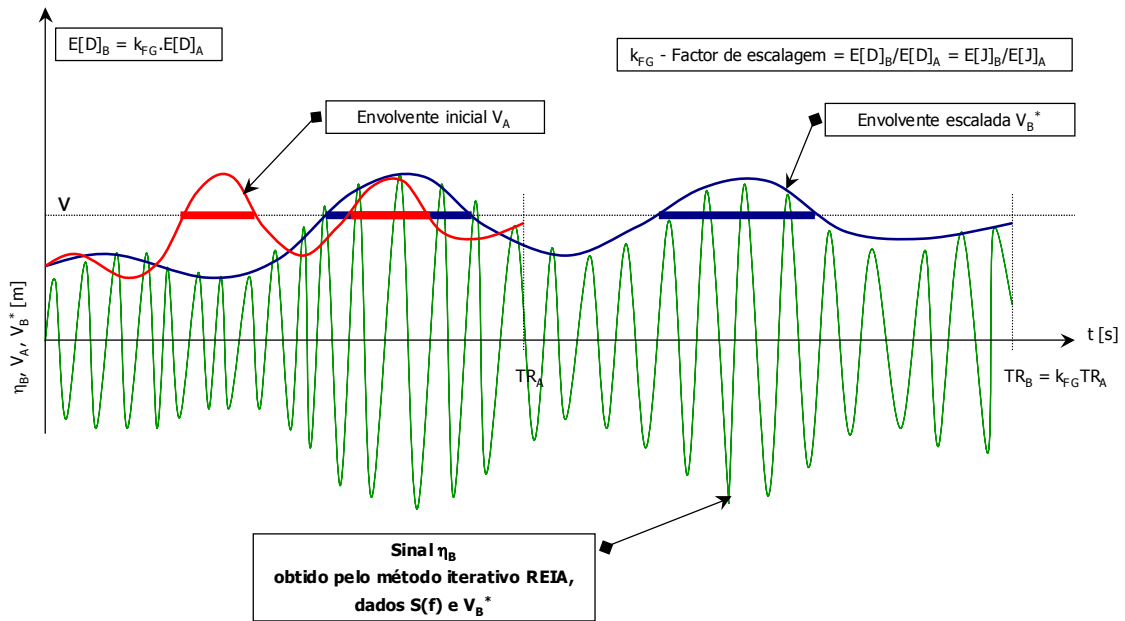
**Fig. 4-10 - Envelopes  $V_A(t)$  e  $V_B^*(t)$ . Cálculo de  $E[D]_B$  e de  $k_{FG}$**

Note-se que, para este exemplo em que  $k_{FG} = 2$ , as durações de nível  $v$  (ilustradas, na Fig. 4-10, com segmentos horizontais a traço grosso) são aumentadas para o dobro dos seus valores iniciais.

<sup>11</sup> O exemplo que se vai seguir considera que se pretende  $E[D]_B = 2 E[D]_A$

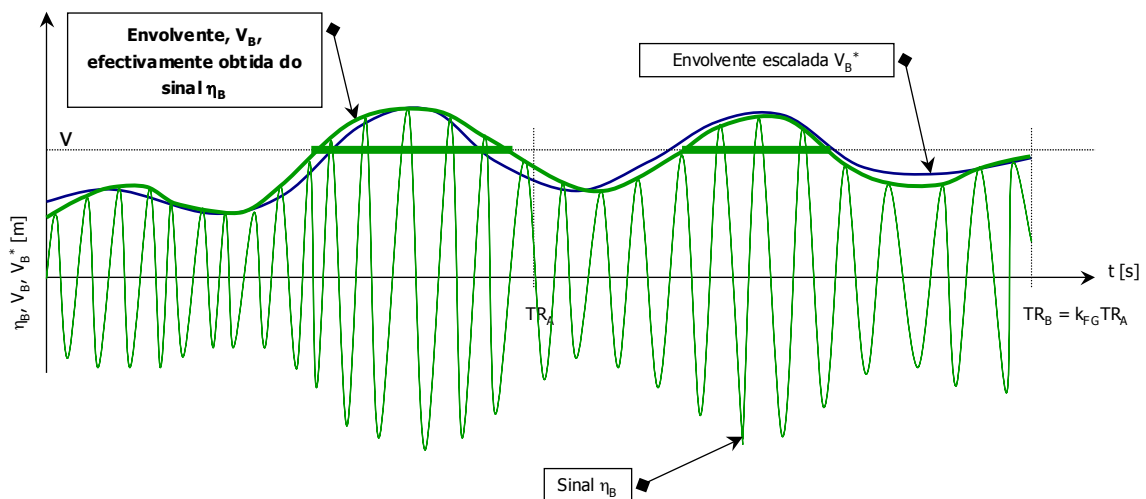


Utilizando agora, fora do procedimento de escalagem propriamente dita, o método iterativo REIA, descrito em 4.3.1.1, pode construir-se um sinal,  $\eta_B(t)$ , baseado num dado espectro,  $S(f)$ , e na envolvente pretendida (escalada),  $V_B^*(t)$ . Na Fig. 4-11 são mostrados este novo sinal, a verde, a envolvente pretendida  $V_B^*(t)$ , a azul, e a envolvente inicial,  $V_A(t)$ , a encarnado.



**Fig. 4-11 - Novo sinal,  $\eta_B(t)$ , baseado em  $S(f)$ , e na envolvente escalada,  $V_B^*(t)$**

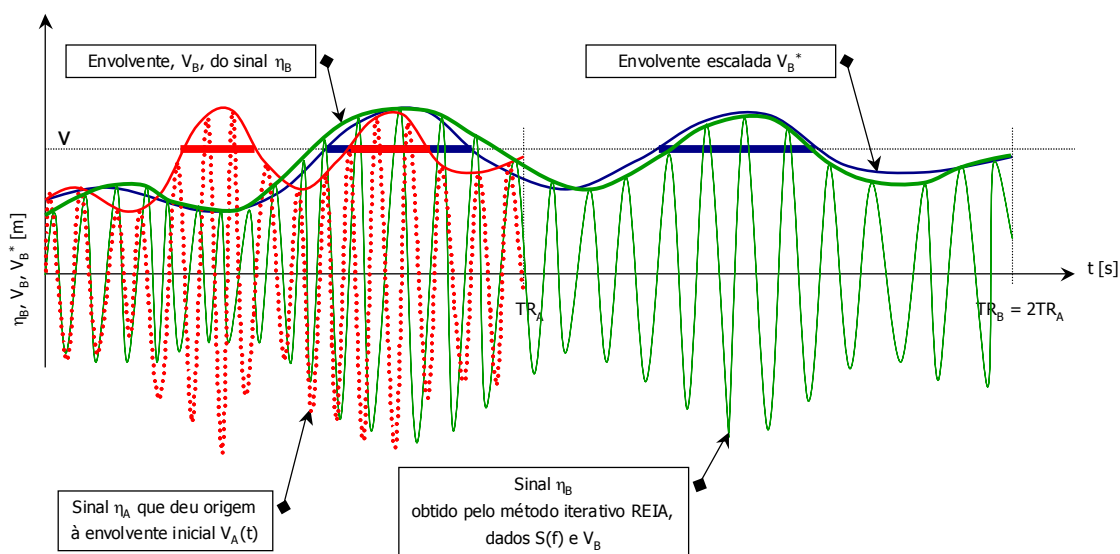
Repare-se agora na Fig. 4-12 onde estão representados o novo sinal obtido pelo método iterativo REIA (a verde, com traço fino), a envolvente pretendida (a azul) e a envolvente do novo sinal (a verde, com traço grosso).



**Fig. 4-12 - Comparação da envolvente escalada  $V_B^*(t)$  com a envolvente efectiva  $V_B(t)$**

Verifica-se que as formas das envolventes obtidas, genericamente chamadas  $V_B(t)$ , podem não ser exactamente as mesmas que as das envolventes pretendidas,  $V_B^*(t)$  - com a mesma forma de  $V_A(t)$ , mas escaladas (é o que geralmente acontece). Esta diferença é motivada pelas imprecisões do método iterativo REIA, as quais podem ser minoradas com um maior número de iterações.

Na Fig. 4-13 pode ver-se a totalidade dos sinais e envolventes considerados no método da escalagem e no método iterativo REIA. Nesta figura, a duração do sinal  $\eta_B(t)$  é dupla da do sinal  $\eta_A(t)$ , visto que  $k_{FG} = 2$ .



**Fig. 4-13 - Envolventes consideradas no ME**

Como se pode observar na Fig. 4-13, ao considerar-se uma duração média de nível  $v$ ,  $E[D]_B$ , dupla da inicial,  $E[D]_A$  (isto é, com factor de escalagem  $k_{FG} = 2$ ), chega-se à conclusão que o valor de  $E[J]_B$  não é necessariamente o dobro de  $E[J]_A$ , visto que a sucessão de ondas no registo tem origem no método de simulação numérica MFA, Eq. (4-2), onde há intervenção de factores aleatórios.

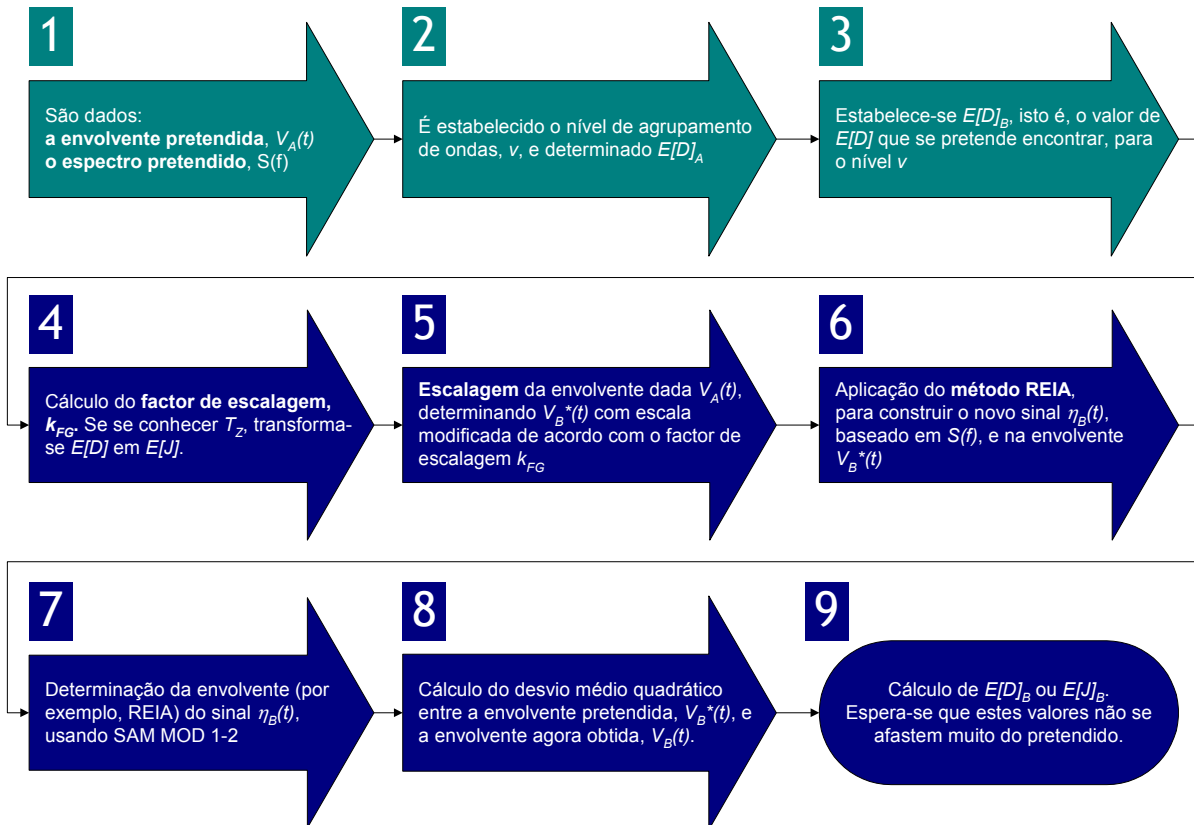
Notar que, no exemplo apresentado, os registos  $\eta_A(t)$  e  $\eta_B(t)$  cujas envolventes são, respectivamente, a inicial e a escalada, têm o mesmo espectro (uma vez que  $\eta_B(t)$  é construído com essa precisa especificação) e, portanto, também o mesmo período médio,  $T_Z$ . Isso significa que a envoltente  $V_B(t)$ , que, espera-se, será aproximadamente igual a  $V_B^*(t)$ , tem uma duração de nível  $v$  que é o dobro da inicial, uma vez que possui o dobro das ondas numa duração igual à inicial.

#### METODOLOGIA

Para a implementação numérica do ME, é utilizada a seguinte metodologia, ilustrada na Fig. 4-14:

1. São dados uma forma da envoltente pretendida,  $V_A(t)$ , de duração  $TR_A$ , e um espectro  $S(f)$  pretendido. (A envoltente pode ser, por exemplo, como se viu, a que se obtém a partir de um registo ou sinal já existente, com um espectro qualquer. Esse registo pode ser simulado

numericamente, utilizando o módulo **SAM MOD 1-2 (Simulação Base Espectro+GO)** – ver **Capítulo 6 - Software de Simulação Numérica e Física**, e a respectiva envolvente determinada através da utilização de um qualquer método de caracterização de envolventes de grupos de ondas).

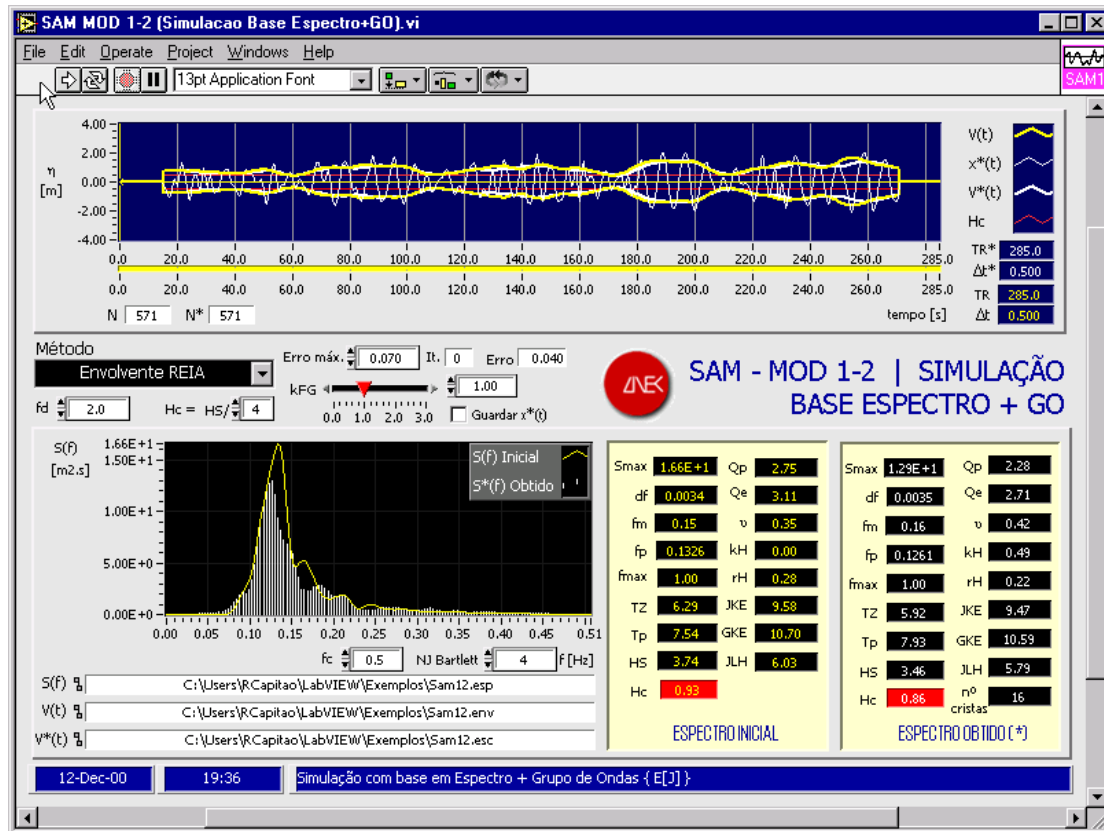


**Fig. 4-14 - Sequência de procedimentos do Método da Escalagem (ME)**

2. É estabelecido o nível de agrupamento de ondas,  $v$ , e determinado o valor  $E[D]$  desta primeira envolvente:  $E[D]_A$ . Ao conhecer-se  $T_Z$ , utiliza-se a Eq. (3-1) para transformar  $E[D]$  em  $E[J]$ .
3. É dado o valor de  $E[D]$  pretendido,  $E[D]_B$ , isto é, o valor de  $E[D]$  que se pretende encontrar, para o nível  $v$ , no novo sinal simulado,  $\eta_B(t)$ .
4. Em consequência, fica definido o factor de escalagem,  $k_{FG}$ .
5. Procede-se à escalagem da envolvente dada  $V_A(t)$ , determinando nova envolvente  $V_B^*(t)$ , a qual se força a ter a mesma forma de  $V_A(t)$ , mas tendo uma escala do eixo temporal modificada de acordo com o factor de escalagem  $k_{FG}$ , acima definido.
6. Mediante utilização do método iterativo REIA, constrói-se um novo sinal  $\eta_B(t)$ , baseado no espectro pretendido,  $S(f)$ , referido em **1.**, e na envolvente  $V_B^*(t)$ , determinada em **5.**

Foi desenvolvido um programa de cálculo automático, em código Turbo-Pascal 6.0, de simulação numérica de sinais (ou registos),  $\eta(t)$ , de frequência e amplitude moduladas, de nome **FASESPE**. Este programa está agora integrado no pacote geral de *software* apresentado com esta dissertação – ver **Capítulo 6 - Software de Simulação Numérica e Física**. Este módulo do pacote de simulação numérica e física utiliza o método iterativo REIA para a determinação do novo registo numérico simulado com o espectro e envolvente dados (ver exemplo de aplicação na Fig. 4-15).

7. É determinada uma envolvente (por exemplo, a REIA) do novo sinal  $\eta_B(t)$ , usando o programa **SAM MOD 1-2 (Simulação Base Espectro+GO)**.
8. Utilizando o método dos mínimos quadrados, é calculado o desvio entre a envolvente pretendida,  $V_B^*(t)$ , e a envolvente agora obtida,  $V_B(t)$ .
9. Considerando o novo sinal  $\eta_B(t)$ , calcula-se  $E[D]_B$  (ou, usando a Eq. (3-1),  $E[J]_B$ ). Espera-se que este valor não se afaste muito do pretendido.



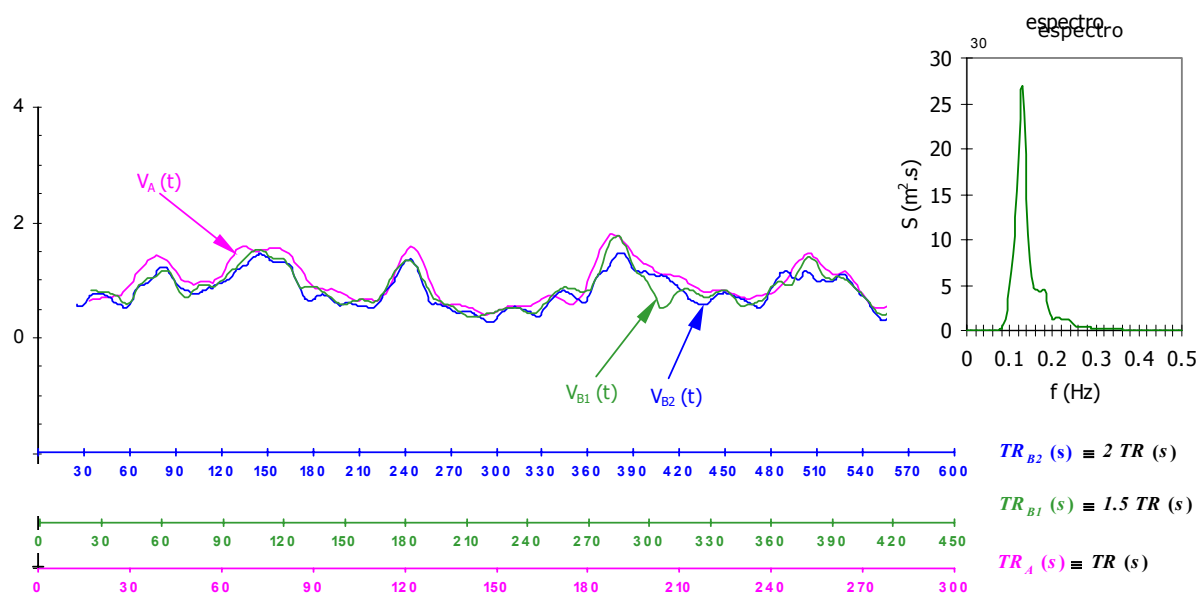
**Fig. 4-15 - Exemplo de aplicação do programa SAM MOD 1-2 (Simulação Base Espectro+GO)**

Na Fig. 4-16 mostra-se um exemplo de aplicação do ME utilizando três escalas temporais diferentes.

Nesta figura comparam-se a envolvente inicial,  $V_A(t)$ , e as envoltentes obtidas após escalagem,  $V_{B1}(t)$  e  $V_{B2}(t)$ , sendo que os índices  $B_1$  e  $B_2$  se referem às duas diferentes experiências onde se pre-

tendiam registos simulados  $\eta_{B1}(t)$  e  $\eta_{B2}(t)$  com valores de  $E[J]$  1.5 e 2 vezes maiores do que o valor  $E[J]$  de  $\eta_A(t)$ , respectivamente.

É de notar as discrepâncias, embora bastante ligeiras, das envolventes referidas. Estas diferenças podem ser eventualmente reduzidas através do aumento do número de iterações do método iterativo REIA usado no programa **SAM MOD 1-2 (Simulação Base Espectro+GO)**.



**Fig. 4-16 - Comparação da envolvente inicial  $V_A(t)$  com as envolventes escaladas,  $V_{B1}(t)$  e  $V_{B2}(t)$ , por forma a obter-se registos cujos valores de  $E[J]$  sejam 50% e 100% maiores que o  $E[J]$  inicial – Escalas temporais diferentes**

Este exemplo mostra que, apesar de o ME estar longe de ser exacto, tem a virtude de produzir envolventes de boa qualidade. Analisa-se a seguir a valia do método através da comparação de valores de  $E[J]$ , utilizando como envolventes as que se obtêm de um conjunto de registos simulados numericamente.

#### ANÁLISE DE RESULTADOS

Por forma a verificar a capacidade do método proposto em produzir os valores de  $E[J]$  pretendidos, considerou-se um total de 50 registos de onda, de duração  $T_R = 1500$  s (25 minutos), capazes de fornecer igual número de funções envolventes necessárias para a verificação do ME.

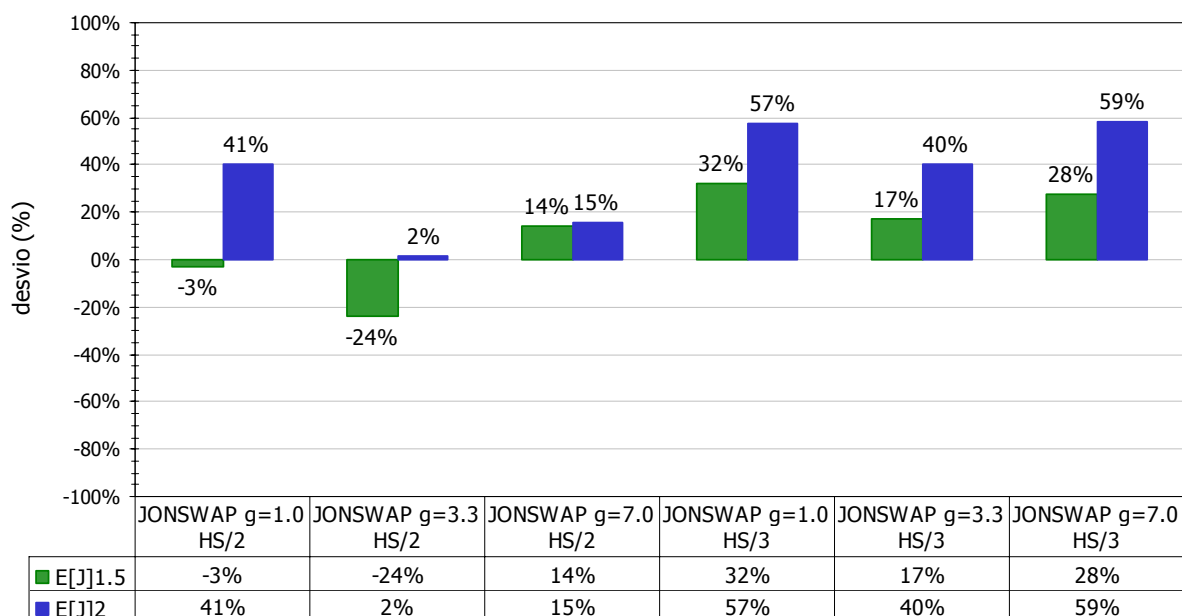
Para produzir estes registos utilizou-se o método MFA, Eq. (4-2), considerando um espectro JONSWAP com período de pico,  $T_p = 8$  s (Ver Eq. (A-20) do **Anexo 2 - Definição de Espectros Empíricos**). Estes 50 registos foram agrupados em dois conjuntos, designados por **G1** e **G2**:

- G1** 30 registos, 10 para cada uma das seguintes larguras espectrais:  $\gamma = 1.0, 3.3$  e  $7.0$ ;
- G2** 20 registos para um único espectro, com largura espectral,  $\gamma = 3.3$ , por forma a obter uma comparação mais precisa entre valores de  $E[J]$ .

Para cada um dos registos de onda, e para os níveis  $v = H_S/2$  e  $H_S/3$ , foram calculados os valores de  $E[J]$ .

Utilizando o ME, seguindo os passos **1** a **9**, descritos anteriormente, obtiveram-se, para o conjunto **G1**, os resultados considerados na Fig. 4-17. Nesta figura representam-se, para os três tipos de espectro considerados e para os dois níveis de grupo, os desvios (expressos em %) dos valores de  $E[J]$  obtidos face aos valores de  $E[J]$  pretendidos, para diferentes larguras espectrais do espectro de JONSWAP e diferentes níveis. Recorda-se que, em cada caso, se trata de valores médios de 10 registos. Recorda-se também, que a comutação  $E[D] \rightarrow E[J]$  é efectuada mediante simples utilização da Eq. (3-1).

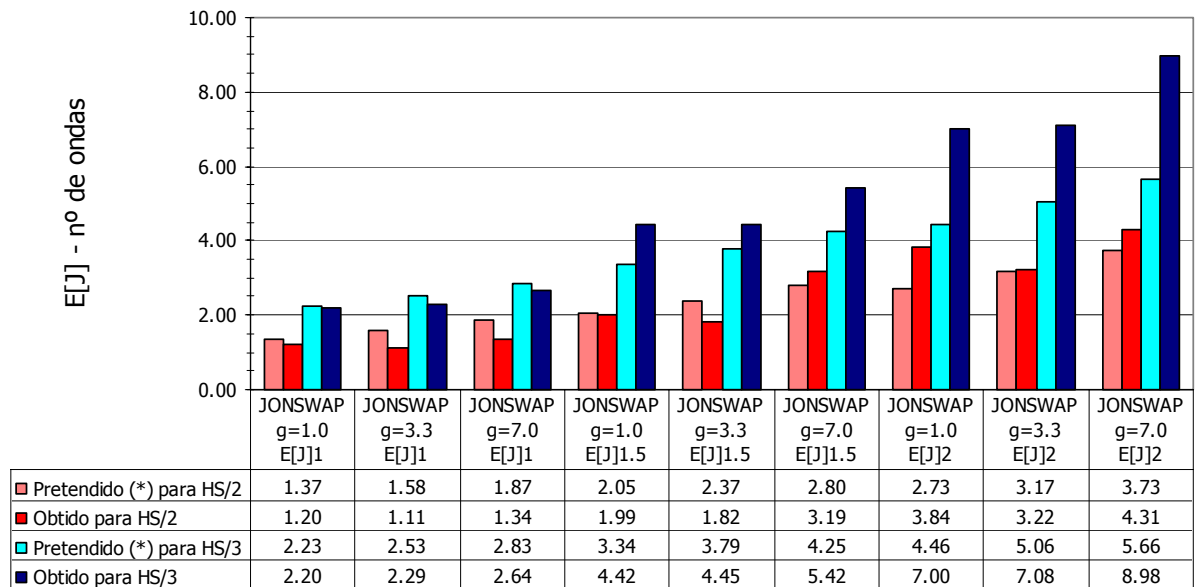
Nas Figs. 4-17 a 4-21 designam-se por  $E[J]_1$ ,  $E[J]_{1.5}$  e  $E[J]_2$  os valores obtidos de  $E[J]$  calculados com base em envolventes escaladas, quando se pretendia, respectivamente, uma envolvente igual (sem mudança de escala), uma envolvente com um valor de  $E[J]$  50% superior ao do sinal inicial, e uma envolvente com um valor de  $E[J]$  duplo do inicial. Nestas figuras,  $g = \gamma$ , parâmetro do espectro de JONSWAP.



**Fig. 4-17 - Desvio entre  $E[J]$  pretendido e  $E[J]_{1.5}$  e  $E[J]_2$  obtidos – Conjunto G1**

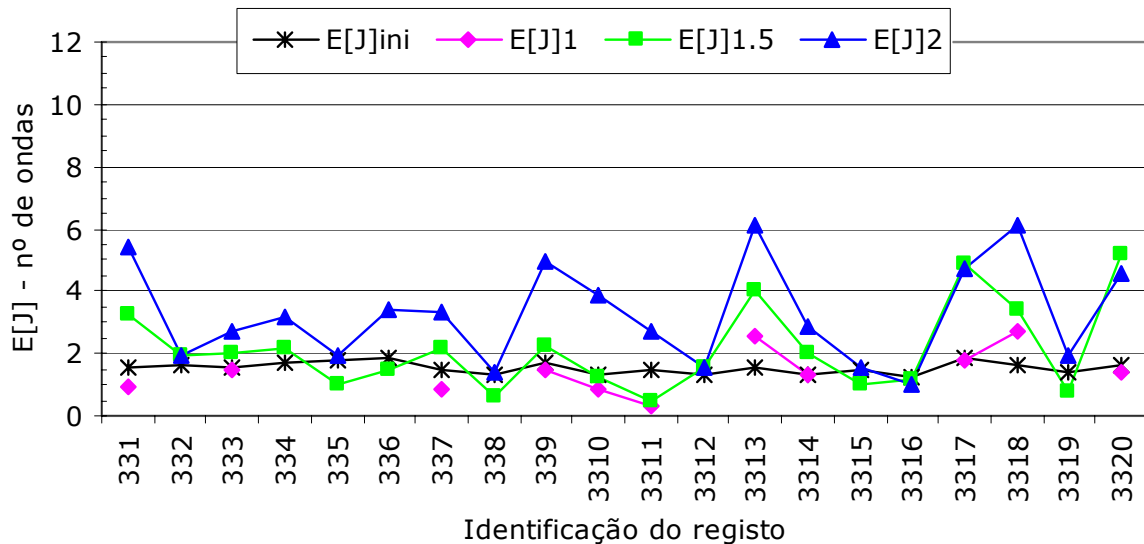
Da observação desta figura, pode concluir-se existirem desvios significativos entre valores de  $E[J]$  obtidos e pretendidos nas diferentes condições ( $E[J]_{1.5}$  e  $E[J]_2$ ).

Verifica-se também que essa diferença é tanto maior quanto menor é o nível de agrupamento considerado (neste caso, para  $H_S/3$ ). Isso pode ser observado na Fig. 4-18. Considerando o mesmo nível  $v$ , obtêm-se piores resultados quando se pretendem elevadas reduções ou aumentos do factor de escalagem.



**Fig. 4-18 - Valores de  $E[J]$  para diferentes níveis  $v$  - Conjunto G1**

Se se considerarem agora os registos, e respectivas envolventes, com 25 minutos de duração, do conjunto **G2**, e se se fizer o mesmo tipo de estudo feito anteriormente, verifica-se que existe uma grande variabilidade nos valores obtidos de  $E[J]$   $\{E[J]_1, E[J]_{1.5} \text{ e } E[J]_2\}$  ao considerar o nível  $v=H_S/3$ . Chega-se a uma conclusão semelhante nos testes em que se pretendia um valor de  $E[J]$  muito maior que o inicial,  $E[J]_{ini}$ . A Fig. 4-19 e a Fig. 4-20 mostram essas diferenças quando se varia o nível de  $H_S/2$  para  $H_S/3$ .



**Fig. 4-19 - Valores de  $E[J]$  para  $g=3.3, v=H_S/2$  - Conjunto G2**

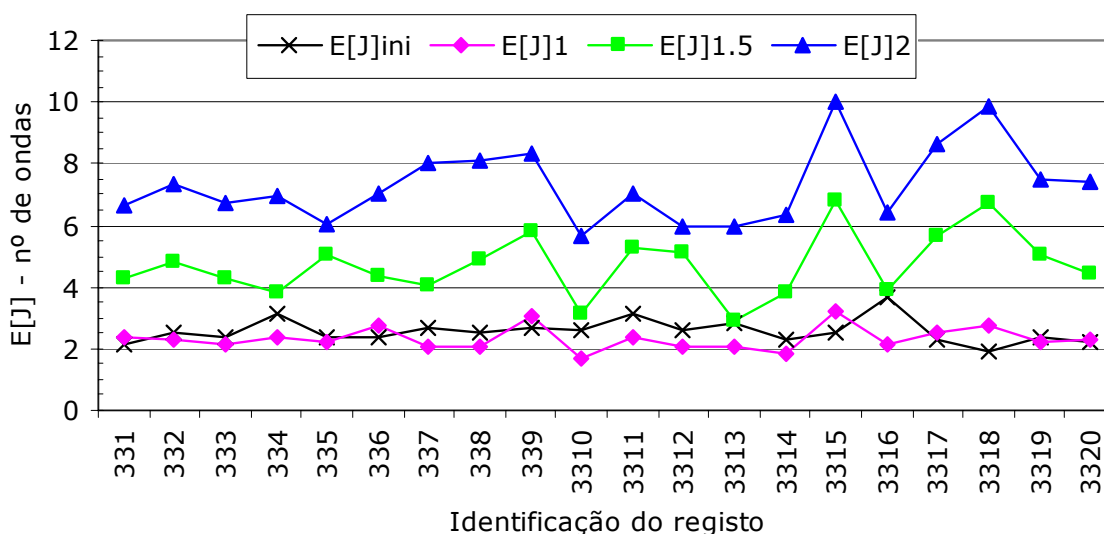


Fig. 4-20 - Valores de  $E[J]$  para  $g=3.3$ ,  $v = H_s/3$  - Conjunto G2

Na Fig. 4-21 apresenta-se um sumário das simulações do conjunto **G2**, considerando os mesmos dois níveis de agrupamento.

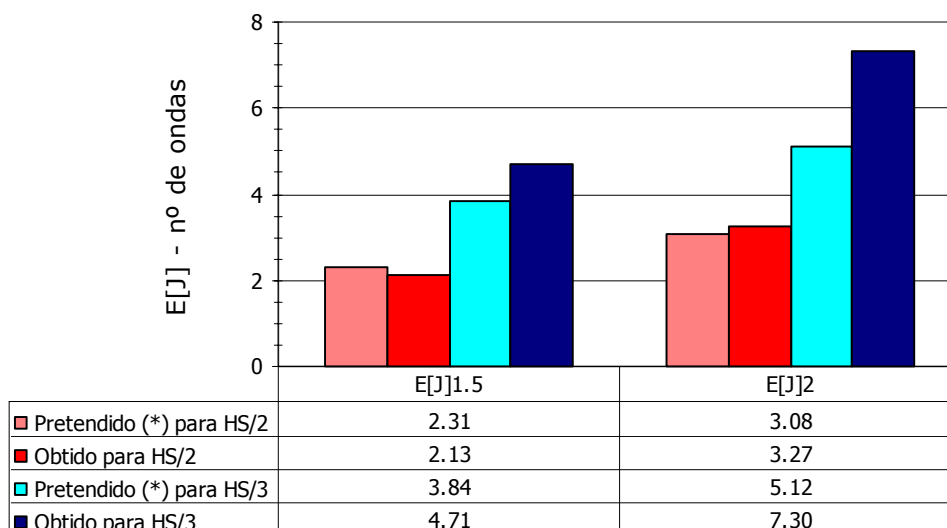


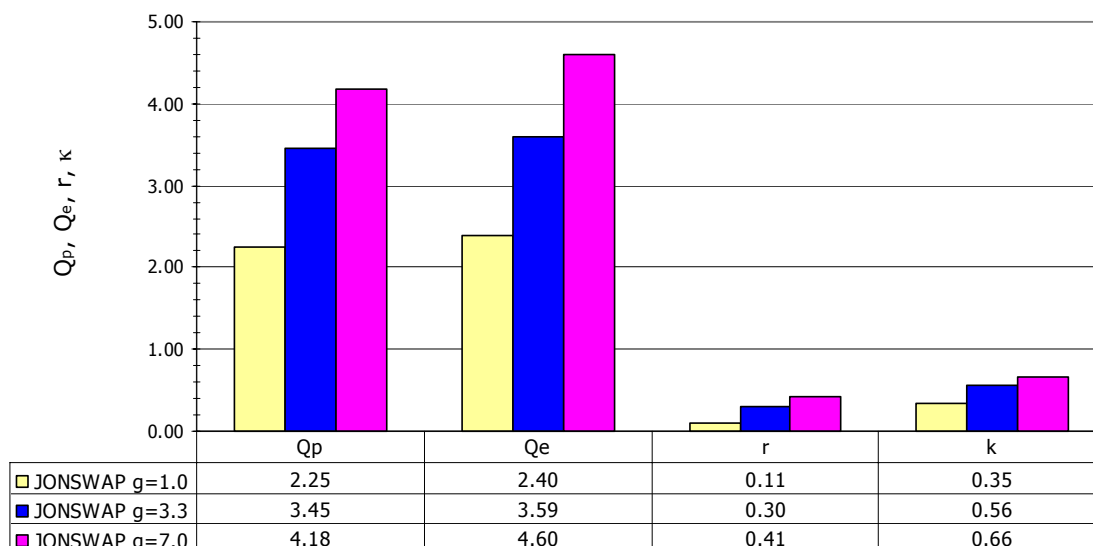
Fig. 4-21 - Médias de  $E[J]$  para os níveis  $H_s/2$  e  $H_s/3$  - Conjunto G2

Torna-se claro desta figura que as médias dos valores pretendidos e obtidos de  $E[J]$  são razoavelmente semelhantes quando o nível de grupo é  $H_s/2$ , qualquer que seja o valor de  $E[J]$  pretendido na simulação. Contudo, estas divergem consideravelmente se se utilizar um nível bastante mais baixo,  $H_s/3$ , acentuando-se as diferenças à medida que o valor de  $E[J]$  pretendido aumenta.



Estas diferenças poderão ser reduzidas através da imposição de um maior número de iterações no método iterativo REIA, utilizado no programa FASESPE.

A Fig. 4-22 ilustra a variação dos parâmetros espectrais descritos na Secção 3.7.2, com a largura (ou factor de reforço) espectral de JONSWAP,  $\gamma$ . Verifica-se, da observação da figura, que à medida que o espectro se torna mais estreito, correspondente a um maior valor de  $\gamma$  (ou  $g$  na figura), maior é o valor daqueles parâmetros, o que indica mais grupos de ondas como se viu atrás.



**Fig. 4-22 - Variação de parâmetros espectrais com  $g = \gamma$**

Assim, conclui-se que o método proposto modifica de modo razoavelmente adequado um registo inicial por forma a conter mais ou menos ondas numa mesma forma da envolvente, consoante se pretenda no novo registo mais ou menos grupos de ondas. No entanto, parece que tal comportamento não é, de forma linear, transposto para o cálculo de  $E[J]$ , principalmente se se usa um nível de grupo reduzido.

#### 4.3.2 ESPECIFICAÇÃO DO AGRUPAMENTO ATRAVÉS DE UM REGISTO DE ONDA

##### DADO

##### 4.3.2.1 INTRODUÇÃO

Outra possibilidade de simulação numérica de registos de onda com dado agrupamento de ondas é a de, para além de especificar amplitudes provenientes de um dado espectro,  $S(f)$ , especificar também as fases correspondentes através da análise harmónica directa de um determinado registo (ou sinal),  $r(t)$ . Pode, por exemplo, interessar simular numericamente um sinal que tenha um determinado espectro e que contenha as fases correspondentes a um determinado conjunto de grupos de ondas presente num certo registo real.

No método da simulação numérica com base em registo dado, apresentado nesta secção, há apenas que proceder à análise harmónica do registo  $r(t)$ , retirar as suas fases, e substituir as fases do registo  $\eta(t)$  simulado com dado espectro por estas. Por conseguinte, neste método, não há lugar a quaisquer iterações.

#### 4.3.2.2 METODOLOGIA

O método de simulação de um registo  $\eta(t)$ , de duração  $T_R$ , a partir de um espectro  $S(f)$  e de um outro registo inicial  $r(t)$ , compreende, assim, os seguintes passos:

1. Determinação, através de análise harmónica, das fases  $\phi_k$  do sinal,  $r(t)$ , sabendo-se que

$$r(t) = \sum_{k=1}^N b_k \sin\left(2\pi \frac{k}{T_R} t + \phi_k\right) \quad (4-16)$$

2. Determinação das amplitudes  $s_k$  correspondentes ao espectro dado,  $S(f)$ , através de:

$$s_k = \sqrt{\frac{2}{T_R} S\left(\frac{k}{T_R}\right)} = \sqrt{2S(f_k)\Delta f} \quad (4-17)$$

3. Obtenção de  $\eta(t)$ , através de :

$$\eta(t) = \sum_{k=1}^N s_k \sin\left(2\pi \frac{k}{T_R} t + \phi_k\right) \quad (4-18)$$

Desta forma, o sinal simulado terá as amplitudes  $s_k$ , obtidas do espectro  $S(f)$ , e as fases correspondentes  $\phi_k$ , obtidas do sinal dado  $r(t)$ .

A verificação deste método pode fazer-se, por exemplo, calculando as envolventes de ambos os sinais  $r(t)$  e  $\eta(t)$ . Estas deverão ter um andamento muito semelhante, à parte a diferença de amplitudes. Assim,  $\eta(t)$  deverá ter o espectro  $S(f)$  e apresentar, por exemplo, o mesmo valor de  $E[J]$ , que  $r(t)$ , (Capitão e Carvalho, 1997a).

Apesar de o programa **FASESPE** contemplar este método, o módulo correspondente do pacote **SAM**, de nome **SAM MOD 1-2 (Simulação Base Espectro+GO)**, não permite ainda este tipo de simulação numérica.

### 4.3.3 ESPECIFICAÇÃO DO AGRUPAMENTO ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO CONDICIONADA

#### 4.3.3.1 INTRODUÇÃO

O algoritmo da *Simulação Condicionada* (SC), desenvolvido por Giménez *et al.*, 1990, após trabalhos de Borgman, 1969, 1980, 1982, 1990 e Borgman *et al.*, 1990, permite a introdução de

uma sequência de ondas dada,  $\eta_e(t)$ , num registo de ondas,  $\eta_u(t)$ , sem alterar as características espectrais deste último registo. É assim possível simular um registo com um dado espectro e no qual se pretende que, num dado intervalo  $(t_1, t_2)$ , aquele tenha certo perfil pré-definido. Apesar da inclusão deste perfil (série temporal) no registo simulado, pretende-se que não haja quaisquer modificações nas propriedades espectrais das ondas.

Esta via de simulação da agitação marítima é, do ponto de vista prático, bastante interessante, visto que permite incluir, por exemplo, um ou vários "trechos" de um dado temporal num registo com um dado espectro. Outro aspecto que pode ser simulado com este algoritmo é o dos grupos de ondas.

#### 4.3.3.2 METODOLOGIA

O método numérico SC pode ser usado tanto no domínio do tempo como no da frequência, sendo em qualquer dos casos composto por duas etapas principais:

- 1.** Consideração de uma série temporal, ou registo, não condicionada,  $\eta_u(t)$ , de espectro  $S_u(f)$ . Este registo pode ser real ou simulado.
- 2.** Inclusão de uma série determinística de ondas (que poderá ser, por exemplo, um dado registo de um temporal, ou um ou vários grupos de ondas, etc.),  $\eta_e(t)$ , na série temporal referida em **1.**, entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$ , correspondentes aos pontos da série  $n_1$  e  $n_2$ .

Segundo o algoritmo de Giménez *et al.*, 1990, a nova série condicionada,  $\eta_c(t)$ , apesar de apresentar um aspecto diferente da que lhe deu origem,  $\eta_u(t)$ , exhibe as mesmas características espectrais,  $S_u(f)$ , da primeira.

A produção da nova série condicionada pode ser concretizada tanto no domínio do tempo como no da frequência. Obviamente que o intervalo de digitalização desta sequência deve ser igual ao do da série inicial  $\eta_u(t)$ , isto é,  $\Delta t$ .

É de esperar que este algoritmo forneça melhores resultados se a série determinística a incluir na série não-condicionada for pequena. Assim, prevê-se ser necessário estabelecer um critério limite para a duração desta série, quando comparada com a série não-condicionada. Por outro lado, é evidente que se se pretender introduzir  $P$  sequências e não apenas uma, o algoritmo terá de ser utilizado  $P$  vezes.

#### 4.3.3.3 ALGORITMO NO DOMÍNIO DO TEMPO

A sequência determinística  $\eta_e(t)$  é introduzida na série temporal não-condicionada  $\eta_u(t)$  directamente entre os pontos  $n_1$  e  $n_2$  dessa série. Fora desse intervalo, ou seja, dos pontos  $1$  a  $n_1-1$  e de  $n_2+1$  a  $N$ , os valores da série inicial terão de ser modificados por forma a manter a estrutura de correlações associada ao espectro,  $S_u(f)$ , do registo que, como se disse, se deve manter constante.

Assim, a série temporal condicionada,  $\eta_c$ , será definida por:

$$\eta_c(n\Delta t) = \eta_e(n\Delta t) \quad \text{para } n \in (n_1, n_2) \quad (4-19)$$

$$\eta_c(n\Delta t) = \eta_u(n\Delta t) + C_{12} X \quad \text{para } n \notin (n_1, n_2) \quad (4-20)$$

sendo

$$C_{12} = [c_{n-n_1} \quad c_{n-n_1+1} \quad \dots \quad c_{n-n_2}] \quad (4-21)$$

$c_k$  a covariância no ponto  $|k|\Delta t$  associada ao espectro de variância  $S_u(f)$

$X$  a solução do seguinte sistema de equações ( $v = n_2 - n_1$ ):

$$\begin{bmatrix} c_0 & c_1 & \dots & c_v \\ c_1 & c_0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & c_1 \\ c_v & \dots & c_1 & c_0 \end{bmatrix} X = \begin{bmatrix} \eta_e(n_1\Delta t) \\ \eta_e((n_1+1)\Delta t) \\ \vdots \\ \eta_e(n_2\Delta t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \eta_u(n_1\Delta t) \\ \eta_u((n_1+1)\Delta t) \\ \vdots \\ \eta_u(n_2\Delta t) \end{bmatrix} \quad (4-22)$$

Uma descrição teórica mais pormenorizada deste algoritmo pode ser encontrada em Borgman, 1990.

#### 4.3.3.4 ALGORITMO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

O algoritmo para o domínio da frequência é equivalente ao já descrito para o domínio temporal. As sequências não-condicionada e condicionada podem, como é hábito, ser sintetizadas pela sobreposição de sinusóides de frequências de múltiplos inteiros da frequência fundamental

$$\Delta f = \frac{1}{N\Delta t} \quad (4-23)$$

como se segue:

$$\eta_u(n\Delta t) = \sum_{k=0}^{N-1} (a_k - i b_k) e^{i2\pi kn / N} \quad (4-24)$$

$$\eta_c(n\Delta t) = \sum_{k=0}^{N-1} (\alpha_k - i\beta_k) e^{i2\pi kn / N} \quad (4-25)$$

Através de análise de Fourier de  $\eta_u(t)$ , determinam-se imediatamente os coeficientes  $a_k$  e  $b_k$ . Estes, relacionam-se com os coeficientes  $\alpha_k$  e  $\beta_k$  da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \alpha_k \\ \beta_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_k \\ b_k \end{bmatrix} + C_{12}^* X \quad (4-26)$$

sendo  $X$  a solução do sistema de equações (4-22). É neste sistema que se introduz a série determinística,  $\eta_e(t)$ , sendo  $c_k$  a covariância no ponto  $|k|\Delta t$  associada ao espectro de variância  $S_u(f)$  e  $C_{12}^*$  dado por:

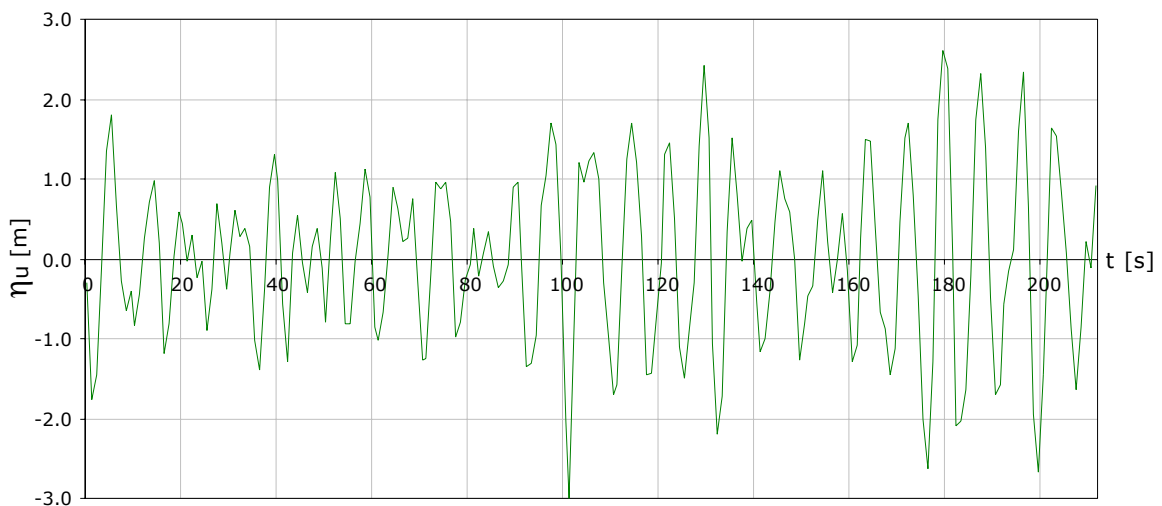
$$C_{12}^* = S_u(k\Delta f)\Delta f \begin{bmatrix} \cos(2\pi kn_1/N) & \cos(2\pi k(n_1+1)/N) & \dots & \cos(2\pi kn_2/N) \\ \sin(2\pi kn_1/N) & \sin(2\pi k(n_1+1)/N) & \dots & \sin(2\pi kn_2/N) \end{bmatrix} \quad (4-27)$$

Também em Borgman, 1990, pode ser encontrada uma descrição teórica mais detalhada deste algoritmo. Foi este algoritmo, no domínio da frequência, o utilizado no programa de cálculo automático **SIMCOND**, que se descreve na secção a seguir.

#### 4.3.3.5 APLICAÇÃO PRÁTICA

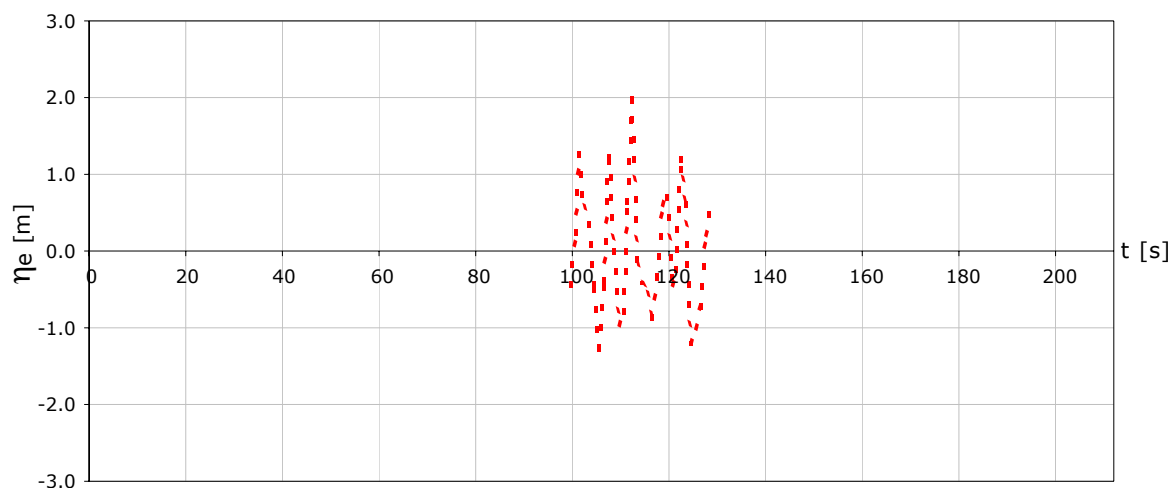
Com base na teoria apresentada na secção anterior, Giménez *et al.*, 1990, elaboraram um conjunto de rotinas escritas em linguagem de programação Fortran 77, conjunto a que o autor deste trabalho chamou **SIMCOND**. Este modelo consiste em várias rotinas as quais, basicamente, resolvem o problema da simulação condicionada numericamente, no domínio da frequência, com base na manipulação de matrizes e algumas FFT.

A Fig. 4-23 mostra os primeiros 210 s de uma série de 512 s de um registo  $\eta_u(t)$  simulado numericamente com base num espectro de características idênticas às de todos os apresentados até aqui neste trabalho, isto é, com espectro JONSWAP de parâmetros  $\gamma = 3.3$ ,  $H_S = 4$  m,  $T_p = 8$  s.



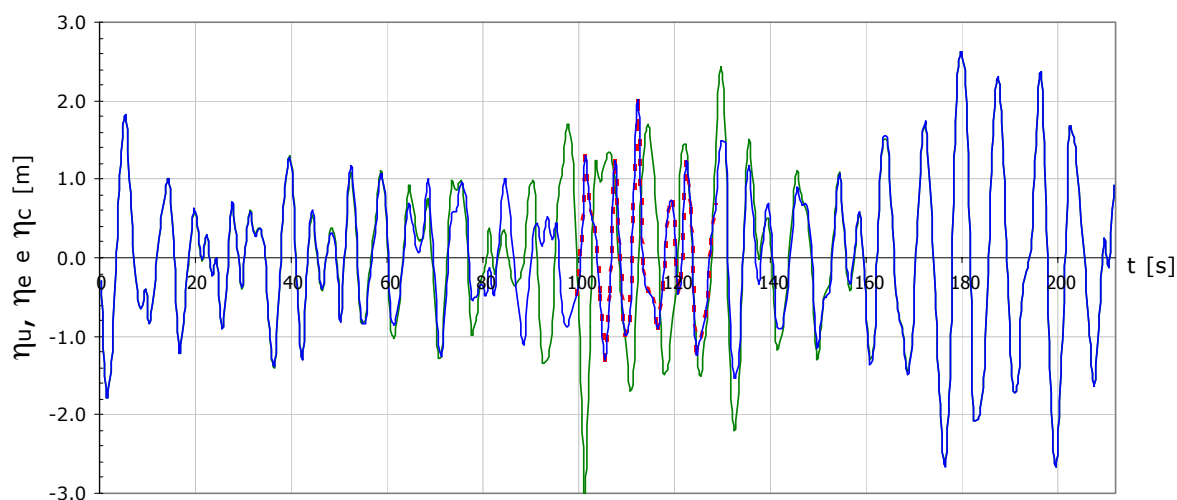
**Fig. 4-23 - Simulação condicionada – série inicial (não condicionada) com espectro  $S(f)$  de JONSWAP,  $H_S = 4$  m e  $T_p = 8$  s**

Na Fig. 4-24 é representada a série determinística  $\eta_e(t)$ , a ser incorporada na primeira série,  $\eta_u(t)$ , entre os instantes  $t_1 = 99$  s e  $t_2 = 128$  s.



**Fig. 4-24 - Simulação condicionada – sequência de 30 pontos a embeber na série inicial, não condicionada**

Finalmente, na Fig. 4-25, mostra-se o sinal condicionado,  $\eta_c(t)$ , com espectro igual ao espectro característico,  $S(f)$ , da primeira série (Fig. 4-23) e com a série determinística representada na Fig. 4-24,  $\eta_e(t)$ . Um extracto do resultados numéricos que originaram estas figuras pode ser consultado no Quadro A-2 do **Anexo 4 - Simulação Numérica**.



**Fig. 4-25 - Série condicionada, —  $\eta_c(t)$ , com espectro  $S(f)$  da série não condicionada, —  $\eta_u(t)$ , e contendo a série dada, - - -  $\eta_e(t)$**

Segundo Giménez *et al.*, 1990, para certos espectros oceânicos típicos, pode haver problemas de instabilidade no processo de inversão da matriz de covariâncias da Eq. (4-22). Por isso, aqueles autores sugerem a adopção de um método para evitar aquelas instabilidades. Esse método consiste na introdução no espectro de variância que dá origem à série não-condicionada (quando esta é simulada) de um nível de ruído muito baixo, aceitável na prática. Aquelles autores verificaram que

a adição de um nível de ruído branco de  $0.0025 m_0$  no espectro de variância conduz a resultados muito satisfatórios. Para além disso, parece conveniente que a série determinística a introduzir,  $\eta_e(t)$ , tenha um tamanho não superior a  $1/10$  da duração total da série não condicionada,  $\eta_u(t)$ .

## 4.4 CONCLUSÕES

Foram apresentados neste capítulo diversos métodos de simulação numérica de registos ou sinais, tendo sido dada especial ênfase ao problema da simulação numérica de grupos de ondas. Consideraram-se os métodos existentes de simulação numérica baseados no conceito de envolvente (um deles, o método da escalagem, desenvolvido no âmbito deste trabalho, com base na escalagem de uma envolvente dada, e outro baseado nas fases calculadas de um registo cujos grupos de ondas se tomaram como modelo) e a chamada simulação condicionada.

O *método da escalagem* (ME), possibilita a determinação de sinais com dado espectro e especificação de grupos de ondas através de uma forma de envolvente e um parâmetro,  $E[J]$  ou  $E[D]$ .

Para a verificação do ME, foram aplicados os programas **FASESPE**, numa fase inicial do trabalho, e **SAM MOD 1-2 (Simulação Base Espectro+GO)**, numa fase posterior, utilizando como envolventes as produzidas por registos simulados numericamente. Porém, da comparação das formas das envolventes iniciais e simuladas, verificaram-se diferenças assinaláveis nos valores que se tomaram para essa comparação: os valores médios dos grupos de ondas,  $E[J]$ . Chegou-se também à conclusão que esta metodologia funciona apenas razoavelmente quando se utilizam níveis de agrupamento de ondas mais elevados (tipicamente,  $H_S/2$ ). Quando se usam níveis mais baixos (tipicamente,  $H_S/3$ ), os resultados são insatisfatórios.

Verificou-se também que o método iterativo REIA, utilizado no ME, permite em poucas iterações a produção de um registo com as características pretendidas, alcançando-se uma mais rápida convergência quando a envolvente pretendida é mais suave.

Conclui-se, em síntese, que o ME permite satisfatoriamente a modificação de uma dada forma de envolvente de modo a que mais ou menos ondas caibam nessa envolvente dada, consoante se pretendam mais ou menos grupos de onda. Claramente, conclui-se também que o método apresentado necessita ainda de algum aperfeiçoamento.

Foi também apresentado neste capítulo, o *método da simulação condicionada* (SC), bastante interessante do ponto de vista prático, visto que permite a introdução de registos de temporais ou grupos de ondas em registos contendo ondas de energia pré-determinada. Este método está funcional sob o ponto de vista numérico.

O programa **SIMCOND**, adaptado de rotinas em linguagem de programação Fortran 77 desenvolvidas por Giménez *et al.*, 1990, não se encontra ainda integrado no pacote de *software* **SAM** apresentado junto com este trabalho, mas pretende-se fazê-lo futuramente em linguagem *G*, ambiente LabVIEW.





# CAPÍTULO 5 - SIMULAÇÃO E MODELAÇÃO FÍSICA DE AGITAÇÃO MARÍTIMA

---

## 5.1 INTRODUÇÃO

Muitos dos problemas existentes em hidráulica marítima estão relacionados com o planeamento e o dimensionamento de obras marítimas e portuárias. Dado que a construção destas estruturas implica avultados investimentos, é habitual a realização de ensaios físicos em canal ou tanque de ondas irregulares, para, em fase anterior à construção, verificar a sua estabilidade e eficácia e a utilidade para que foram propostas.

Na realização de ensaios de obras em canais ou tanques de ondas irregulares, há necessidade de reproduzir adequadamente, à escala, para além dos modelos físicos das estruturas, também as condições de agitação marítima possíveis no local em estudo.

Pretende-se, neste capítulo, mostrar como se podem reproduzir essas condições de agitação marítima, o que, na prática, significa produzir elevações da superfície da água no canal de ondas irregulares que satisfaçam as características de agitação marítima pretendidas. Na especificação dessas características, há três situações distintas a considerar:

- (a) Pretende-se obter um registo na água através da especificação de um espectro;
- (b) Pretende-se obter um registo na água, dados um espectro e certas características de agrupamento de ondas;
- (c) É dado o próprio registo que se pretende obter na água.

A situação (a) é a que mais ocorre na prática laboratorial de ensaios físicos. Para obter um registo na água através da especificação de um espectro, pode utilizar-se um dos vários métodos existentes de descrição de elevações tratados no capítulo anterior. Salienta-se o método das fases aleatórias, MFA, Eq. (4-2). Para utilizar este modelo, será então necessário definir o tipo de espectro que se pretende e os seus parâmetros característicos ( $H_s$  - altura significativa,  $T_p$  - período de pico, etc.).

A situação (b) já não é tão vulgar nos ensaios habituais em laboratório. Este trabalho vai permitir essa possibilidade.

Também a situação (c) não é considerada correntemente, na prática. Trata-se fundamentalmente do problema de colocar na água do canal um registo pré-especificado, e não um qualquer com cer-

to espectro. Para este efeito, vai introduzir-se neste trabalho, em 5.7.1, uma modificação do chamado *método da integração da velocidade horizontal*, de Gravesen *et al.*, 1974.

## 5.2 CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

As instalações experimentais utilizadas no âmbito deste trabalho situam-se no Núcleo de Portos e Praias (NPP) do LNEC. No NPP, realizam-se ensaios em modelo reduzido que visam a verificação da estabilidade de obras marítimas, em particular de quebra-mares e/ou de outras estruturas portuárias, a determinação de galgamentos nessas obras e, finalmente, a determinação de índices de agitação em zonas de abrigo de portos ou marinas. Para isso, é efectuada a modelação física das obras a ensaiar, a uma escala adequada, e, nos ensaios físicos, utilizam-se métodos de geração de ondas descritos mais à frente neste capítulo.

O NPP dispõe de um pavilhão de ensaios com uma área de  $6500 m^2$ , ocupado essencialmente por tanques e canais destinados à execução de ensaios em modelo físico. Na Fig. 5-1 mostra-se um aspecto geral desse pavilhão de ensaios. Pode ver-se, no lado direito desta figura, o canal de ondas irregulares (COI 1) utilizado nos ensaios físicos referidos neste trabalho.

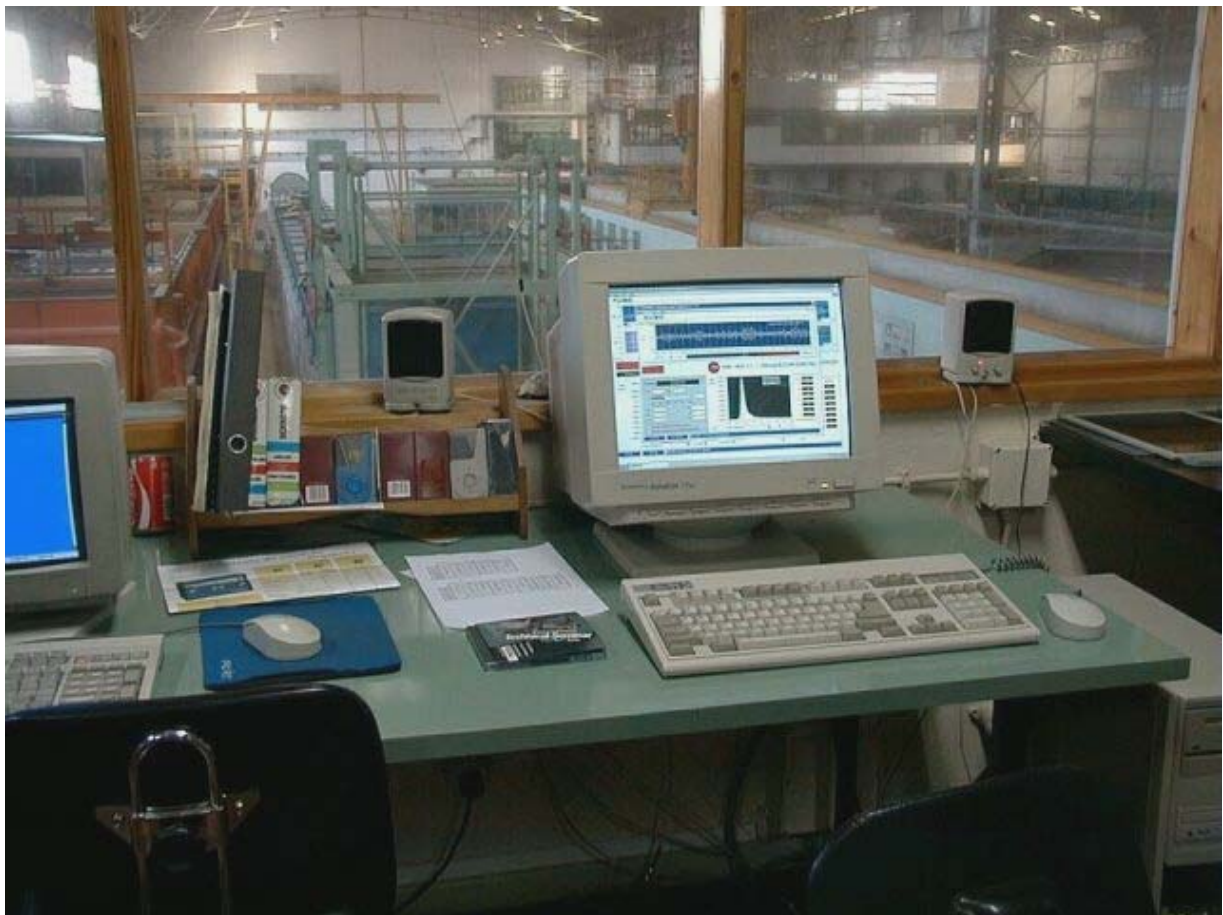


**Fig. 5-1 - Aspecto geral do pavilhão de ensaios de hidráulica marítima do LNEC**

Habitualmente, nos tanques realizam-se estudos tridimensionais de estabilidade e de agitação, enquanto nos canais se realizam estudos bidimensionais de estabilidade e galgamentos.

O pavilhão de ensaios dispõe também de uma sala (Central de Medidas) para comando centralizado de todos os canais e tanques de ondas irregulares e para recepção dos sinais provenientes dos modelos. Esta sala está adequadamente equipada com computadores, assim como de placas de geração e aquisição de sinais e de equipamentos de vídeo, a partir dos quais se podem monitorizar sondas, sensores de forças e de movimentos, etc..

A Fig. 5-2 apresenta um aspecto de um computador usado no controlo de um batedor, com uma vista, através da janela da Central de Medidas, do pavilhão de ensaios (pode ver-se também o canal utilizado nos ensaios, posicionado exactamente atrás do monitor do computador em destaque).

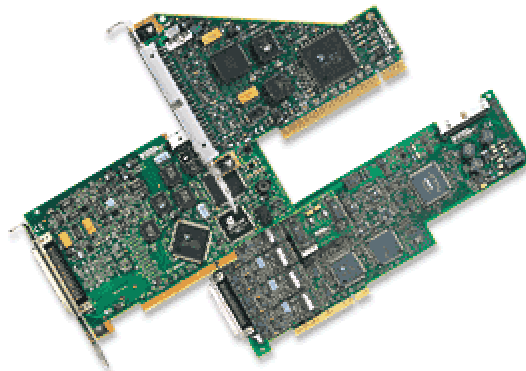


**Fig. 5-2 - Aspecto de um computador usado para a simulação, geração, aquisição de dados e controlo do batedor**

Para os ensaios correntes, e para os ensaios realizados no âmbito deste trabalho, são utilizados, em particular, os seguintes equipamentos:

- *Placa de geração e aquisição de dados:* Neste trabalho utilizou-se uma placa DAQ (*Digital Acquisition Board*) com a seguinte designação: *National Instruments, AT-MIO-16E-2 Data Acquisition Board*, de 16 bits de resolução, com 2 canais para geração de ondas e 8 canais

de aquisição (modo diferencial) – as entradas das sondas resistivas. Na Fig. 5-3, mostram-se três exemplos destas placas.



**Fig. 5-3 - Placas DAQ multifunções (MIO) da National Instruments**

→ *Sondas resistivas*: Estas sondas têm como base de funcionamento a variação da resistência eléctrica dos fios condutores. Ver exemplo na Fig. 5-4.



**Fig. 5-4 - Aspecto de uma sonda resistiva utilizada nos ensaios**

Os *sinais analógicos* recolhidos por estas sondas são, mediante uso de um conversor analógico-digital ADC (*Analogue-to-Digital Converter*), convertidos em sinais digitais, formando assim um conjunto finito de valores segundo a variável independente (tempo). Esta operação, efectuada na placa DAQ, é designada por *aquisição do sinal*.

Considere-se um sinal analógico  $x(t)$  e faça-se uma amostragem desse sinal a intervalos regularmente espaçados de  $\Delta t$ , *intervalo de amostragem*, inverso da *frequência de aquisição*,  $f_a$ . Deste modo, pode formar-se uma amostra de valores de  $x(t)$  em  $t = \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t$ , etc. e o sinal digital é, assim, formado pelos valores dessa amostra,  $x[i] = x(i.\Delta t)$ , para  $i = 1, \dots, N$ , valores discretos tomados do sinal analógico original.

Assim, o sinal  $x(t)$  inicial será representado por  $N$  valores. De notar que esta representação da realidade, chamada *representação digital*, não contém qualquer informação relativa à frequência de digitalização.

Uma vez que a informação computacional (dados, código, etc.) é armazenada digitalmente no computador sob a forma de "bits", cada aquisição do sinal analógico tem que ser convertida em bits por forma a ser possível o seu processamento computacional. Esta conversão é feita com se disse através da utilização de um conversor ADC (*Analogue-to-Digital Converter*) geralmente existente na placa de aquisição de dados DAQ.

Neste contexto, um aspecto relativo à análise e processamento de sinais que importa realçar, diz respeito à resolução da placa de aquisição de dados DAQ, isto é, ao número de bits que o conversor ADC utiliza para representar o sinal digital amostrado. Quanto maior for a resolução, em bits, maior será a precisão com que é possível detectar uma modificação do sinal analógico. Por exemplo, se se tiver um sinal analógico com valores na gama de  $-1\text{ V}$  a  $1\text{ V}$ , e a resolução permitida pela placa de aquisição for de apenas 3 bits, então há  $2^3=8$  combinações possíveis na gama  $-1\text{ V}$  a  $1\text{ V}$  e, assim, a precisão do conversor ADC não ultrapassa  $2/8=0.25\text{ V}$ , o que representa uma manifesta falta de resolução. Porém, a placa de aquisição utilizada neste estudo tem uma resolução de 16 bits, o que permite  $2^{16}=65\ 536$  combinações possíveis, possibilitando assim uma representação digital do sinal analógico original extremamente precisa.

## 5.3 GENERALIDADES SOBRE SIMULAÇÃO FÍSICA

### 5.3.1 SEMELHANÇA MODELO—PROTÓTIPO

Uma vez que neste capítulo se vai tratar a questão da modelação física, em canal ou tanque, tem interesse apresentar alguns tópicos da *teoria da semelhança*, a qual permite a transposição para o *protótipo* de resultados obtidos sobre um *modelo* a uma dada *escala*.

Segundo Hughes, 1993, a base da modelação física "*...is the idea that the model behaves in a manner similar to the prototype it is intended to emulate*". Há, portanto, em primeiro lugar, que garantir um comportamento idêntico do modelo físico em relação ao protótipo, ou seja, há que garantir a *semelhança modelo-protótipo*. Isso pode ser traduzido através, nomeadamente, das semelhanças geométrica, cinemática e dinâmica de todas as solicitações actuantes no protótipo e no modelo.

É difícil garantir todas as semelhanças entre modelos e protótipos. No entanto, em modelos hidráulicos marítimos podem considerar-se como forças dominantes as de gravidade e pressão, sendo que, tanto a viscosidade do fluido (água) como a tensão superficial podem ser consideradas desprezáveis face às anteriores. É o que diz basicamente a *lei semelhança de Froude*, muito utilizada em estudos deste tipo e considerada também neste trabalho.

Por conseguinte, adoptando a lei da semelhança de Froude, e supondo que a escala do modelo no canal ou tanque é  $1/a$ , obtêm-se as seguintes relações entre protótipo e modelo de maior interesse para a matéria tratada neste trabalho (Quadro 5-1).

**Quadro 5-1 - Relações entre protótipo e modelo**

| <b>Tipo de escala</b> | <b>Protótipo</b> | <b>Modelo à escala 1/a</b> |       |
|-----------------------|------------------|----------------------------|-------|
| <b>Espaço</b>         | $l$              | $\frac{1}{a}l$             | (5-1) |
| <b>Tempo</b>          | $t$              | $\frac{1}{\sqrt{a}}t$      | (5-2) |
| <b>Frequência</b>     | $f$              | $\sqrt{a}f$                | (5-3) |

Nos ensaios em modelo físico a realizar, há que contar com estas relações para obter valores devidamente escalados.

Por exemplo, se for  $\eta_p(t)$  a elevação da superfície da água no protótipo e  $\eta_m(t)$  a correspondente elevação no modelo a uma escala  $1/a$ , tem-se

$$\eta_m(t) = \frac{1}{a} \eta_p(t \cdot \sqrt{a}) \quad (5-4)$$

De igual modo, sendo  $S_p(f)$  o espectro de variância no protótipo e  $S_m(f)$  o espectro num modelo à escala  $1/a$ , tem-se

$$S_m(f) = \frac{1}{a^2 \sqrt{a}} S_p\left(\frac{f}{\sqrt{a}}\right) \quad (5-5)$$

Normalmente, em ensaios correntes de estabilidade e galgamentos em canais de ondas irregulares, usam-se escalas geométricas na ordem de  $1:50$ , ou seja, os modelos têm medidas lineares 50 vezes mais pequenas que o protótipo.

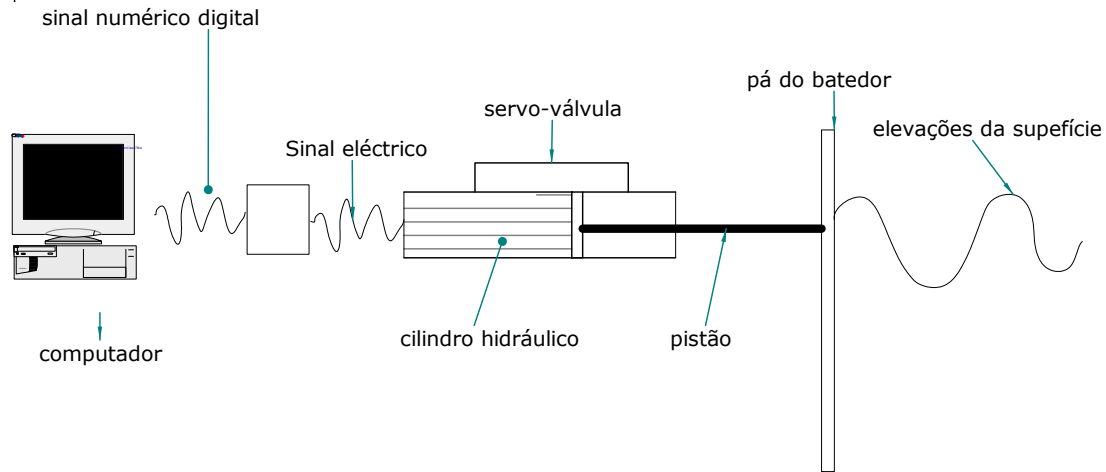
### 5.3.2 MODELAÇÃO DO SISTEMA: MOVIMENTO DO BATEDOR-ELEVAÇÃO DA ÁGUA

A linearidade do sistema *{movimento do batedor-elevação da água}* é a hipótese de base admitida neste trabalho. Recorde-se, de acordo com a Secção 2.5, que um sistema é *linear* quando a resposta ou saída,  $y(t)$ , a uma dada excitação ou entrada,  $x(t)$ , tem as propriedades aditiva e homogénea, Eqs. (2-18) e (2-19).

Admite-se, ainda, que o sistema é invariante no tempo, Eq. (2-20).

Considera-se que com estas duas hipóteses, se obtém um rigor suficiente para os fins a que se destina a geração de ondas irregulares.

Considere-se o seguinte esquema utilizado na maior parte das instalações experimentais, mostrado na Fig. 5-5.



**Fig. 5-5 - Representação esquemática da geração física de agitação em canal**

Para produzir, num dado instante, uma determinada elevação da superfície da água,  $\eta(t)$ , num canal ou tanque, é necessário fornecer ao gerador de ondas (pistão) um determinado movimento horizontal, designado genericamente por  $x(t)$ . Como é óbvio, a saída que se pretende,  $y(t)$ , é precisamente a função da elevação da superfície da água,  $\eta(t)$ .

Num gerador de ondas do tipo pistão, as elevações (verticais) da superfície da água são produzidas através do movimento (horizontal) da pá do batedor. Esta é accionada pelo pistão hidráulico de acordo com as ordens da servo-válvula, a qual é alimentada por um sinal eléctrico proporcional a um sinal digital gerado numericamente no computador, como indicado no capítulo anterior. O curso do actuador é proporcional a um sinal eléctrico (em Volts) que controla a servo-válvula.

Se o sistema  $\{\text{movimento do batedor}, x(t); \text{elevação da superfície da água}, \eta(t)\}$  for linear e invariante no tempo, e se  $x(t)$  tiver a forma de uma sinusóide, de frequência  $f_0$ ,

$$x(t) = a \sin(2\pi f_0 t + \theta) \quad (5-6)$$

então  $\eta(t)$  terá, aproximadamente, também a forma de uma sinusóide, com a mesma frequência, embora com fase  $\phi$  (Carvalho, 1990):

$$\eta(t) = b \sin(2\pi f_0 t + \phi) \quad (5-7)$$

Neste caso, demonstra-se, Carvalho, 1973, que, para a frequência comum,  $f_0$ , o ganho do sistema,  $e(f)$ , é dado pelo cociente das amplitudes das sinusóides:

$$e(f_0) = |H(f_0)| = \frac{b}{a} \quad (5-8)$$

Para o caso geral de  $x(t)$  [e, portanto,  $\eta(t)$ ], Biéssel e Suquet, 1951, e, mais tarde, Gilbert *et al.*, 1971, e Dean e Dalrymple, 1991, desenvolveram fórmulas teóricas para cálculo do ganho para vários tipos de sistemas de batedores de ondas, dentre os quais se salienta a fórmula obtida para o sistema do tipo pistão (utilizado neste trabalho):

$$e(f) = \frac{2 \left[ \sinh\left(\frac{2\pi d}{L(f)}\right) \right]^2}{\left[ \sinh\left(\frac{2\pi d}{L(f)}\right) \cosh\left(\frac{2\pi d}{L(f)}\right) + \left(\frac{2\pi d}{L(f)}\right) \right]} \quad (5-9)$$

sendo  $L(f)$  o comprimento de onda da sinusóide de frequência  $f$ , à profundidade  $d$ , calculado de acordo com as Eqs. (2-33) ou (2-37).

Se o gerador fosse do tipo articulado (*hinged*, em inglês), a fórmula do ganho do sistema seria dada pela Eq. (5-10):

$$e(f) = \frac{2 \left[ 1 - \cosh\left(\frac{2\pi d}{L(f)}\right) + \frac{2\pi d}{L(f)} \sinh\left(\frac{2\pi d}{L(f)}\right) \right] \sinh\left(\frac{2\pi d}{L(f)}\right)}{\frac{2\pi d}{L(f)} \left[ \sinh\left(\frac{2\pi d}{L(f)}\right) \cosh\left(\frac{2\pi d}{L(f)}\right) + \frac{2\pi d}{L(f)} \right]} \quad (5-10)$$

Esta é a forma teórica de calcular o ganho do sistema. Se, no entanto, existirem registros de  $x(t)$  e  $\eta(t)$ , e se estes puderem ser considerados realizações de PE estacionários, então uma outra forma (empírica) de determinação do ganho do sistema é, como se deduz das Eqs. (2-26), (2-24) e (2-23), dada por:

$$e(f) = \left| \frac{S_{x\eta}(f)}{S_x(f)} \right| \quad (5-11)$$

ou

$$e(f) = \sqrt{\frac{S_\eta(f)}{S_x(f)}} \quad (5-12)$$

sendo:

$S_x(f)$  - o espectro de  $x(t)$ ;

$S_\eta(f)$  - o espectro de  $\eta(t)$ ;

$S_{x\eta}(f)$  - o espectro cruzado de  $x(t)$  e  $\eta(t)$ , de acordo com a Eq. (2-9).

Pode calcular-se facilmente o deslocamento necessário a dar ao pistão para produzir uma certa sinusóide na água. Segundo a Eq. (5-8), a amplitude de uma sinusóide na água,  $b$ , está relacionada com a amplitude do movimento horizontal do batedor,  $a$ , através de:

$$b = a e(f) \quad (5-13)$$



No caso de um gerador do tipo pistão, o deslocamento total do batedor,  $X$ , é dado por:

$$X = 2a \quad (5-14)$$

Por exemplo, veja-se como obter, com um gerador do tipo pistão, uma onda sinusoidal na água com a altura de  $10\text{ cm}$  (amplitude de  $5\text{ cm}$ ) e um período de  $T = 2\text{ s}$  ( $f = 0.5\text{ Hz}$ ), quando a profundidade no canal é de  $1\text{ m}$ :

1. Das Eqs. (2-37) e (2-36), obtém-se:

$$L = 2\sqrt{9.81 \times 1} \left[ 1 - \frac{\pi}{3} \frac{2\pi \times 1}{9.81} \times \frac{1}{2^2} \right] \times \left[ 1 + 3.102 \left( \frac{2\pi \times 1}{9.81} \times \frac{1}{2^2} \right)^{4.11} \right] = 5.22\text{ m}$$

2. Da função de transferência para o tipo de batedor utilizado (pistão), Eq. (5-9), resulta, para  $f = 0.5\text{ Hz}$ :

$$e(f) = \frac{2 \left[ \sinh \left( \frac{2\pi \times 1}{5.22} \right) \right]^2}{\left[ \sinh \left( \frac{2\pi \times 1}{5.22} \right) \cosh \left( \frac{2\pi \times 1}{5.22} \right) + \left( \frac{2\pi \times 1}{5.22} \right) \right]} = 1.162$$

3. Para obter uma sinusóide de  $0.1\text{ m}$  de altura no canal, será necessário uma amplitude do pistão:

$$a = \frac{b}{e(f)} = \frac{0.05}{1.162} = 0.043\text{ m} \quad (5-15)$$

4. Assim, o movimento total do pistão (*stroke*) terá de ser de  $X = 2a = 8.6\text{ cm}$  para obter uma onda regular na água com  $10\text{ cm}$  de altura, junto ao batedor.

De igual modo, ao conhecer-se o ganho do sistema, por utilização de uma das equações referidas, é possível obter no canal registos de ondas com um dado espectro  $S_\eta(f)$ , desde que o batedor seja alimentado por um sinal do movimento do batedor com o seguinte espectro:

$$S_x(f) = \frac{S_\eta(f)}{e^2(f)} \quad (5-16)$$

É este o processo utilizado nos ensaios correntes efectuados no LNEC, e considerado no pacote de *software* SAM descrito no **Capítulo 6 - Software de Simulação Numérica e Física**.

## 5.4 GERAÇÃO DA ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE COM ESPECTRO ESPECIFICADO

Este tipo de geração de ondas irregulares é o mais utilizado em laboratórios de hidráulica marítima. Antes de este tipo de geração se ter tornado habitual, utilizava-se geração com ondas

regulares, isto é, simulavam-se e geravam-se registos cujos espectros tinham uma única componente sinusoidal.

Fundamentalmente, existem dois tipos de modelos de simulação da elevação da superfície com espectro especificado: através de síntese de séries temporais (Secção 5.4.1) e através de filtragem electrónica de ruído branco (Secção 5.4.2), ambos descritos a seguir.

#### 5.4.1 ATRAVÉS DE SÍNTESE DE SÉRIES TEMPORAIS

Ao especificar-se o espectro pretendido na água,  $S_\eta(f)$ , indica-se qual a distribuição da energia pelas frequências que se pretende obter no registo simulado.

Os passos necessários à utilização deste método são os seguintes:

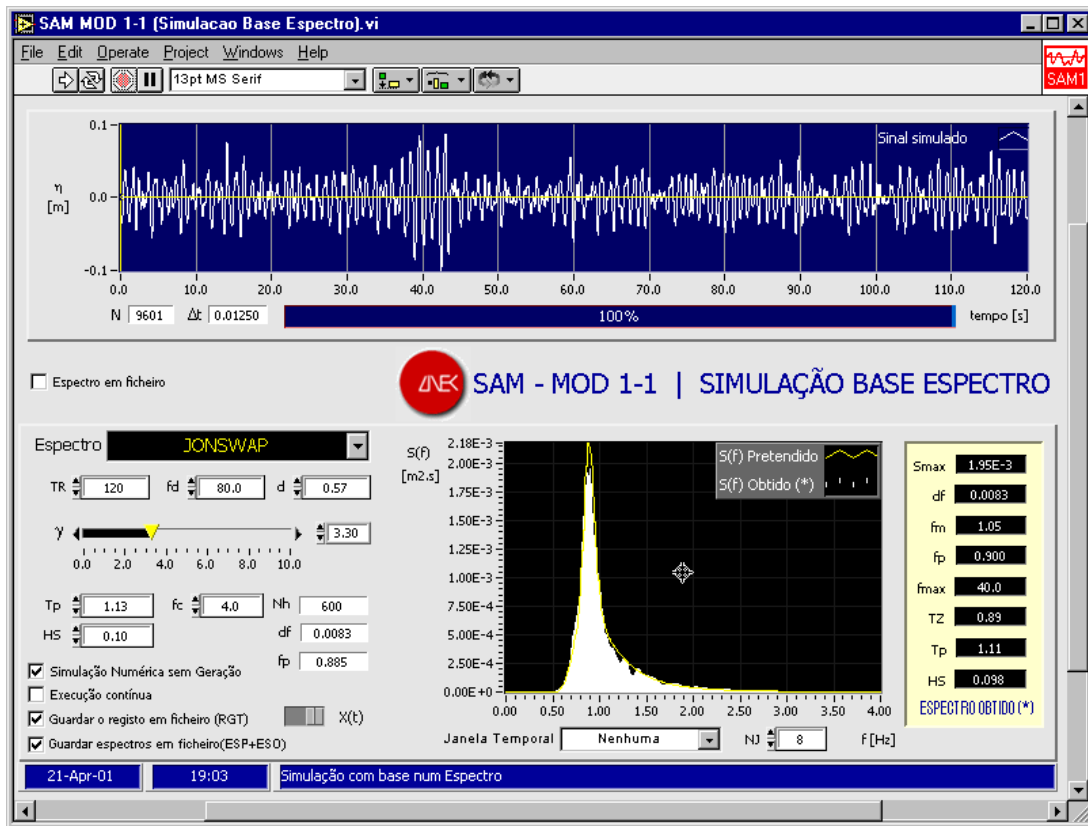
- 1** Com base no espectro conhecido,  $S_\eta(f)$ , e na função de ganho do sistema,  $e(f)$ , calculada de acordo com a Eqs. (5-9) ou (5-10), calcula-se o espectro do movimento do batedor,  $S_x(f)$ , utilizando a Eq. (5-16). Se o espectro conhecido, protótipo,  $S_\eta(f)$ , for reproduzido num canal ou tanque, a uma dada escala, aquele tem que ser convertido para a escala do modelo, utilizando a Eq. (5-5).
- 2** É gerado numericamente um sinal,  $x(t)$ , através da utilização de um modelo de elevações da superfície livre, normalmente o MFA, Eq. (4-2), que, pela sua importância, aqui se reproduz:

$$x(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2S_x(f_k) \Delta f} \sin(2\pi f_k t + \phi_k) \quad (5-17)$$

- 3** O sinal numérico (digital), em *metros*, assim obtido, é convertido em unidades de tensão eléctrica, *Volts*, de acordo com os limites de tensão impostos quer pelo equipamento electro-mecânico do gerador de ondas, quer pela placa de geração de sinais (geralmente de  $-10 V$  a  $+10 V$ ). Deste modo, há que escalar o sinal  $x(t)$  de acordo com os limites referidos.
- 4** Este sinal eléctrico digital é convertido em sinal analógico através de um conversor D/A (Digital para Analógico) localizado à entrada da servo-válvula que comanda o gerador de ondas.
- 5** O sinal eléctrico, assim convertido, é injectado na servo-válvula e o batedor movimenta-se de acordo com o sinal  $x(t)$ .
- 6** Em consequência, obtém-se um sinal,  $\eta(t)$ , na água, de espectro  $S_\eta(f)$ .

Este modelo, designado *modelo de simulação da elevação da superfície com espectro especificado através de síntese de séries temporais*, está incluído no módulo **SAM MOD 1-1 (Simulação Base Espectro)** do

pacote de *software* SAM, descrito na Parte III desta dissertação. Um exemplo de um painel do referido módulo com os resultados da aplicação deste modelo é mostrado na Fig. 5-6.



**Fig. 5-6 - Exemplo do módulo SAM MOD 1-1 (Simulação Base Espectro)**

#### 5.4.2 ATRAVÉS DE FILTRAGEM ELECTRÓNICA DE RUÍDO BRANCO

O método da filtragem electrónica de ruído branco fornece resultados semelhantes aos do método anterior. Neste método, consideram-se os seguintes passos (Carvalho, 1990):

- 1 Mediante a utilização de um aparelho gerador de ruído branco, começa-se por gerar um sinal,  $r(t)$ , dessa natureza, na gama de frequências de interesse, de espectro

$$S_r(f) = r^2 \quad (5-18)$$

em que  $r$  é uma constante.

- 2 A função de ganho do filtro electrónico,  $e_r(f)$ , que se deverá aplicar a este espectro por forma a obter um espectro  $S_x(f)$ , deverá ter a mesma forma que este espectro, pelo que

$$e_r(f) = \frac{S_x(f)}{S_r(f)} \quad (5-19)$$

ou, utilizando as Eqs. (5-12) e (5-18):

$$e_r(f) = \frac{S_\eta(f)}{r^2 e^2(f)} \quad (5-20)$$

Uma vez que o método da síntese de séries temporais produz bons resultados, idênticos aos que o método da filtragem electrónica de ruído branco origina, e dado que para este último método é necessário um passo adicional de construção de filtros electrónicos, é o primeiro método que se considera neste trabalho, sendo também essa a razão de este modelo não se encontrar disponível no pacote de *software* **SAM**.

## 5.5 SEPARAÇÃO DOS ESPECTROS INCIDENTE E REFLECTIDO

### 5.5.1 INTRODUÇÃO

Quando se efectuam ensaios em canais ou tanques de ondas, verifica-se que a agitação reflectida pelos modelos das obras marítimas (*reflexão*) sobrepõe-se à incidente, reflectindo-se novamente nos geradores de ondas (*re-reflexão*). Isto não tem semelhança com o que se passa na natureza, onde a agitação reflectida é perdida para o largo.

No caso de ensaios de estabilidade ou de galgamentos de quebra-mares, é importante extrair a agitação incidente da agitação medida em frente da obra, que é a soma da agitação incidente e reflectida. Isto, para que se consiga relacionar com os estragos e galgamentos que eventualmente ocorram na obra a agitação incidente. O conhecimento da agitação incidente é também importante em ensaios de agitação, para eventual correcção das reflexões nas obras de abrigo ou nos contornos do modelo.

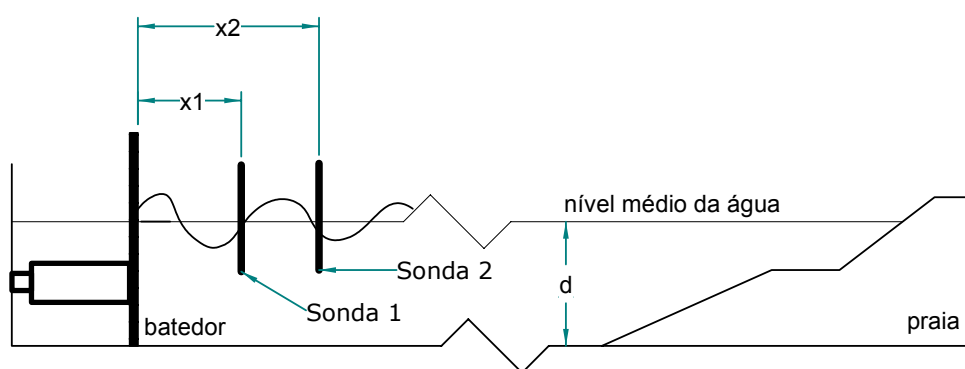
A separação da agitação incidente da agitação reflectida no canal, através do uso dos métodos expostos nesta secção, permitirá, mais tarde, fora do âmbito deste trabalho, o cálculo das compensações a dar aos movimentos do gerador de ondas, por forma a que as reflexões se tornem menos importantes, ou mesmo nulas.

Em ensaios de agitação regular bidimensional (isto é, de cristas longas) é fácil obter as alturas das ondas incidente e reflectida e calcular o respectivo *coeficiente de reflexão* (ver, por exemplo, Moraes, 1971), que é a razão entre as alturas de onda reflectida e incidente, se não houver re-reflexões.

Com agitação irregular bidimensional, é também possível (também se não houver re-reflexões), a partir dos espectros medidos em diversos pontos em frente da obra, obter os espectros incidente e reflectido. Thornton e Calhoun, 1972, Goda e Suzuki, 1976, Morden, 1976, e Mansard e Funke, 1980, sugeriram métodos de cálculo com o objectivo de separar a agitação incidente da reflectida. Estes métodos consistem em deduzir os espectros incidente e reflectido, a partir dos espectros medidos em pontos situados ao longo de uma recta orientada segundo a direcção de propagação

da agitação. O número de pontos é de dois, no caso dos três primeiros trabalhos citados, e de três, no último. O primeiro caso (dois pontos - duas sondas) é o que neste trabalho se designa por *método das 2 sondas*. O segundo caso (três sondas), serve para a generalização que aqui se designa por *método das M sondas* (três ou mais sondas).

Existem outros métodos, não tratados no presente trabalho, para a separação da agitação marítima incidente e reflectida, tal como o *método dos filtros digitais SIRW (Separating the Incident waves and the Reflected Waves)*, desenvolvido por Frigaard e Brorsen, 1995, com base na utilização de filtros digitais e que possibilita a separação das ondas incidentes e reflectidas em tempo real. Este método pressupõe a existência de duas sondas, à distância  $x_1$  e  $x_2$  do batedor, num canal de profundidade  $d$  (Fig. 5-7).



**Fig. 5-7 - Esquema de sondas utilizado no método SIRW**

Tal como nos métodos das 2 e das  $M$  sondas, apresentados a seguir, a elevação da superfície da água, à distância  $x$  do gerador de ondas, é determinada através de uma soma de ondas incidentes e reflectidas.

O método SIRW tem como óbvia vantagem sobre os outros o facto de operar em tempo real. Por outro lado, segundo Frigaard e Brorsen, 1995, o rigor deste método é comparável ao método de Goda e Suzuki, 1976, tendo a vantagem de se conseguir um tratamento mais adequado dos pontos singulares. No entanto, os autores referem que o método SIRW não tem o rigor do método de Mansard e Funke, 1980 (adoptado neste trabalho), desvantagem que poderá ser facilmente ultrapassada ao introduzir-se um maior número de coeficientes nos filtros utilizados nesse método.

Também o *algoritmo LASA (Local Approximation Simulated Annealing)*, de Medina, 2001, actualmente em desenvolvimento, permite a separação da agitação incidente e reflectida em tempo real. Este algoritmo promete ser de grande utilidade para o cálculo das compensações do batedor.

Nesta secção, descrevem-se e aplicam-se o *método das 2 sondas* e o *método das M sondas*, admitindo-se que agitação incidente é um somatório de ondas progressivas harmónicas, deslocando-se no sentido positivo (da esquerda para a direita) e que a agitação reflectida é representada por um somatório de ondas progressivas harmónicas, deslocando-se no sentido contrário (da direita para a

esquerda). A agitação a obter em cada um dos 2 ou mais pontos será a soma das agitações incidente e reflectida. Desprezam-se eventuais segundas reflexões (re-reflexões).

### 5.5.2 TEORIA DOS MÉTODOS DAS 2 E DAS M SONDAS

Para a apresentação teórica do *método das 2 sondas* e do *método das M sondas*, utilizados neste trabalho, usa-se o conceito de *onda progressiva*, isto é, uma função  $z(t, x)$ , de duas variáveis, tal que, fixada qualquer das variáveis, a função é sinusoidal na outra. A fórmula geral da onda progressiva é dada por:

$$z(t, x) = a \sin (\pm 2\pi t / T \pm 2\pi x / L + \theta) \quad (5-21)$$

onde  $\theta$ , a *fase*, é introduzida para tornar arbitrárias as origens de  $t$  e  $x$ . A variável  $t$  é interpretada como *tempo* e a variável  $x$  como *espaço*.  $L$  é, como se sabe, o *comprimento de onda*,  $T$  o *período* e  $a$  a *amplitude*<sup>12</sup>.

A interpretação útil da função  $z(t, x)$  para o problema em estudo é a de uma sinusóide que se move ao longo do eixo dos  $x$ . Verifica-se que sinais diferentes nos dois primeiros termos do argumento do seno da Eq. (5-21) implicam deslocamento da onda progressiva para a direita (sentido positivo), ao passo que o mesmo sinal nos dois termos indica deslocamento para a esquerda (sentido negativo). Assim, uma onda progressiva que se desloca no sentido positivo (*onda incidente*) pode representar-se por

$$z_+(t, x) = a \sin (2\pi t / T - 2\pi x / L + \theta) \quad (5-22)$$

e uma onda progressiva com o mesmo comprimento e período, mas que se mova no sentido negativo (*onda reflectida*), pode ser representada por

$$z_-(t, x) = b \sin (2\pi t / T + 2\pi x / L + \phi) \quad (5-23)$$

em que  $b$  é a amplitude e  $\phi$  é a fase, diferente de  $\theta$ , resultante da reflexão.

Calcule-se agora a soma de uma onda progressiva de sentido positivo, Eq. (5-22), com uma onda progressiva de sentido negativo, Eq. (5-23), quando  $x = 0$ . Obtém-se, fazendo  $\psi = 2\pi t/T$ :

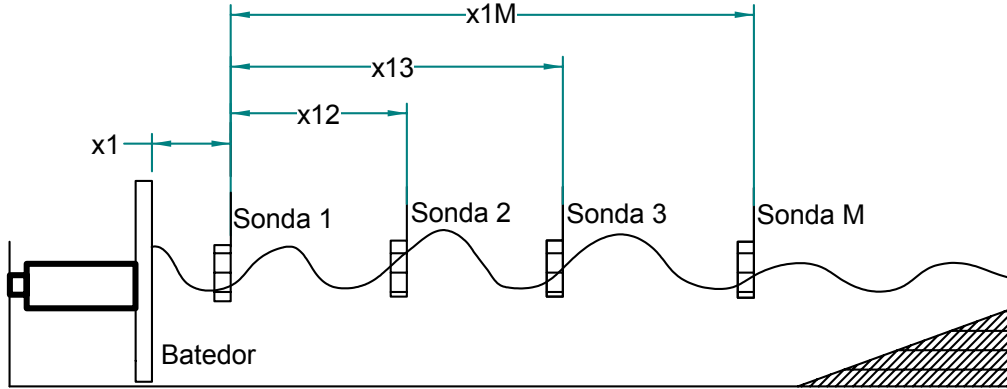
$$\begin{aligned} z_+(t, 0) + z_-(t, 0) &= a \sin (\psi + \theta) + b \sin (\psi + \phi) = \\ &= a (\sin \psi \cdot \cos \theta + \cos \psi \cdot \sin \theta) + b (\sin \psi \cdot \cos \phi + \cos \psi \cdot \sin \phi) \\ &= (a \cos \theta + b \cos \phi) \sin \psi + (a \sin \theta + b \sin \phi) \cos \psi \\ &= A \sin 2\pi t/T + B \cos 2\pi t/T \end{aligned} \quad (5-24)$$

---

<sup>12</sup> No caso de, com esta fórmula, se pretender representar a propagação de uma onda à superfície da água,  $T$  e  $L$  não são independentes, como se viu na Secção 2.6.

o que mostra que a soma resultante das ondas progressivas incidente e reflectida é periódica e tem o mesmo período,  $T$ , que elas.

Considere-se agora (Fig. 5-8) um canal de ondas irregulares, ao longo do qual estão colocadas  $M$  sondas ( $1, 2, \dots, M$ ) a distâncias variáveis umas das outras. Admite-se que, em cada sonda, o sinal observado (elevação da superfície ao longo do tempo) é composto de sinal incidente e sinal reflectido.



**Fig. 5-8 - Esquema de sondas num dado canal**

Considere-se também que o sinal incidente é representado por uma soma de  $N$  sinusóides (ou uma só, no caso das ondas regulares), cada uma delas função de  $t$  e  $x$ , que representam ondas progressivas com movimento, no caso da Fig. 5-8, no sentido positivo ( $\rightarrow$ ). Para o sinal reflectido, a representação será análoga, mas no sentido negativo ( $\leftarrow$ ).

Admitindo, ainda, a hipótese de que a reflexão é linear, então, ao longo da sua duração,  $T=T_R$ , o sinal observado numa dada sonda ( $1$  a  $M$ ) pode ser representado pela soma das contribuições das  $N$  sinusóides incidentes e das correspondentes  $N$  sinusóides reflectidas, do modo seguinte:

**na sonda 1:**

$$X_1(t) = \sum_{k=1}^N I_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{T} - \frac{2\pi x_1}{L_k} + \theta_k\right) + \sum_{k=1}^N R_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{T} + \frac{2\pi x_1}{L_k} + \theta_k + \varphi_{1k}\right) \quad (5-25)$$

**na sonda 2:**

$$X_2(t) = \sum_{k=1}^N I_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{T} - \frac{2\pi(x_1 + x_{12})}{L_k} + \theta_k\right) + \sum_{k=1}^N R_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{T} + \frac{2\pi(x_1 + x_{12})}{L_k} + \theta_k + \varphi_{2k}\right) \quad (5-26)$$

**na sonda n:**

$$X_n(t) = \sum_{k=1}^N I_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{T} - \frac{2\pi(x_1 + x_{1n})}{L_k} + \theta_k\right) + \sum_{k=1}^N R_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{T} + \frac{2\pi(x_1 + x_{1n})}{L_k} + \theta_k + \varphi_{nk}\right) \quad (5-27)$$

em que o primeiro somatório representa o sinal incidente e o segundo o reflectido, sendo  $I_k$  e  $R_k$ , respectivamente, as amplitudes, para cada harmónica, dos sinais incidente e reflectido,  $\varphi_{nk}$  a mudança de fase devida ao trajecto da sonda  $n$  ao obstáculo e volta,  $x_1$  a distância da posição média do batero à sonda 1,  $x_{12}$  a distância da sonda 1 à sonda 2 e  $x_{1n}$  a distância da sonda 1 à sonda  $n$ .

Notar que:

- Esta abordagem exclui quaisquer reflexões para além de uma primeira reflexão à agitação incidente. Estas reflexões para além da primeira foram designadas atrás por *re-reflexões*.
- As fases  $\theta_k$  são independentes da sonda (não têm índice  $n$ ) porque a mudança de fase de sonda para sonda já é dada pelo termo em que intervém  $x_{1n}$ .
- As fases  $\varphi_{nk}$  resultam da distância da sonda  $n$  ao obstáculo. Estas são calculadas, em função das distâncias,  $l$ , da sonda  $n$  ao obstáculo, através da seguinte fórmula (ver Secção intitulada "Obtenção da Fase da Onda Reflectida" do **Anexo 3 - Deduções Matemáticas**):

$$\varphi_{nk}(l) = -4\pi \frac{l}{L_k} + 2i\pi \quad (5-28)$$

em que  $i = \left[ \text{int}\left(\frac{2l}{L_k}\right) + 1 \right]$ , e  $\text{int}(\ )$  significa *parte inteira de* ( ).

De acordo com a análise de Fourier (ver **Anexo 3 - Deduções Matemáticas**), sabe-se que o mesmo sinal,  $X_n(t)$ , na sonda  $n$  e no intervalo  $(0, T_R)$ , pode ser também representado, Eq. (A-3), pela fórmula, com  $T = T_R$ ,

$$X_n(t) = \sum_{k=-N}^N A_{nk} e^{i\frac{2\pi kt}{T}} \quad (5-29)$$

podendo  $A_{nk}$  ser facilmente obtido por análise de Fourier ou espectral.

Se se puder determinar  $I_k$  e  $R_k$  a partir de  $A_{nk}$ , será possível relacionar os sinais incidente e reflectido de várias formas, que se indicarão nas secções seguintes.

Para se obterem equações que permitam determinar  $I_k$  e  $R_k$  a partir de  $A_{nk}$ , começa-se por dar a forma complexa à representação de  $X_n(t)$  apresentada na fórmula geral, Eq. (5-27). Para simplificar a escrita, designar-se-á

$$S_{nk} = \frac{2\pi(x_1 + x_{1n})}{L_k} - \theta_k \quad (5-30)$$

$$V_{nk} = \frac{2\pi(x_1 + x_{1n})}{L_k} + \theta_k + \varphi_{nk} \quad (5-31)$$



e vem

$$X_n(t) = \sum_{k=1}^N I_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{T} - S_{nk}\right) + \sum_{k=1}^N R_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{T} + V_{nk}\right) \quad (5-32)$$

Tendo agora em atenção que

$$I_k = I_{-k} \quad (5-33)$$

$$R_k = R_{-k} \quad (5-34)$$

pode dar-se à equação anterior a forma complexa da Eq. (A-4) do **Anexo 1 - Ferramentas Matemáticas**,

$$X_n(t) = \sum_{k=-N}^N DI_k e^{i\left(\frac{2\pi kt}{T} + \beta_{Ink}\right)} + \sum_{k=-N}^N DR_k e^{i\left(\frac{2\pi kt}{T} + \beta_{Rnk}\right)} \quad (5-35)$$

em que, de acordo com a alínea “**Relação entre (A-2) e (A-4)**” do **Anexo 1 - Ferramentas Matemáticas**, se tem

$$DI_k = I_k/2; DR_k = R_k/2 \quad (5-36)$$

$$V_{Ink} = d/2 - S_{nk}; V_{Rnk} = d/2 + V_{nk} \quad (5-37)$$

e obtém-se

$$X_n(t) = \sum_{k=-N}^N \left[ \frac{I_k}{2} e^{i\left(\frac{\pi}{2} - S_{nk}\right)} + \frac{R_k}{2} e^{i\left(\frac{\pi}{2} + V_{nk}\right)} \right] e^{i\frac{2\pi kt}{T}} \quad (5-38)$$

tendo-se, por outro lado, como se viu,

$$X_n(t) = \sum_{k=-N}^N A_{nk} e^{i\frac{2\pi kt}{T}} \quad (5-39)$$

Portanto,

$$A_{nk} = \frac{I_k}{2} e^{i\left(\frac{\pi}{2} - S_{nk}\right)} + \frac{R_k}{2} e^{i\left(\frac{\pi}{2} + V_{nk}\right)} \quad (5-40)$$

com  $n = 1, 2, \dots, M$

$k = -N, \dots, N$

Assim, para cada  $k$ , têm-se tantas equações do tipo da anterior quantas as sondas, o que permite relacionar  $A_{nk}$  com  $I_k$  e  $R_k$ . É evidente, das fórmulas (5-25) a (5-27), que só interessa o caso  $k > 0$ .

Desenvolvendo as variáveis  $S_{nk}$  e  $V_{nk}$ , usando as Eqs. (5-30) e (5-31), a equação anterior transforma-se em

$$A_{nk} = \frac{I_k}{2} e^{i\left(\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi x_{1n}}{L_k} + \theta_k\right)} e^{-i\left(\frac{2\pi x_{1n}}{L_k}\right)} + \frac{R_k}{2} e^{i\left(\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi x_{1n}}{L_k} + \theta_k + \varphi_{nk}\right)} e^{i\left(\frac{2\pi x_{1n}}{L_k}\right)} \quad (5-41)$$

Fazendo agora, para simplificar<sup>13</sup>,

$$\frac{I_k}{2} e^{i\left(\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi x_{1n}}{L_k} + \theta_k\right)} = Z_{Ik} \quad (5-42)$$

$$\frac{R_k}{2} e^{i\left(\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi x_{1n}}{L_k} + \theta_k + \varphi_{nk}\right)} = Z_{Rk} \quad (5-43)$$

$$\frac{2\pi x_{1n}}{L_k} = U_{nk} \quad (5-44)$$

obtém-se, para cada  $k$ ,

$$A_{nk} = Z_{Ik} e^{-i\alpha_{nk}} + Z_{Rk} e^{i\alpha_{nk}} \quad \text{para } n = 1, 2, \dots, M \quad (5-45)$$

$$Z_{Ik} = X_{Ik} + i Y_{Ik} \quad (5-46)$$

$$Z_{Rk} = X_{Rk} + i Y_{Rk} \quad (5-47)$$

As incógnitas  $Z_{Ik}$  e  $Z_{Rk}$ , são, assim, números complexos, a partir dos quais se obtêm  $I_k$  e  $R_k$ . Com duas sondas ( $M = 2$ ), obtém-se um sistema determinado, duas equações a duas incógnitas (ou, passando ao campo real, quatro equações a quatro incógnitas, como se verá). Com  $M > 2$ , obtém-se um sistema sobredimensionado, que se pode resolver pelo método dos mínimos quadrados. Estes dois casos, que representam, respectivamente, o *método das 2 sondas* e o *método das  $M$  sondas*, são analisados a seguir nas secções 5.5.2.1 e 5.5.2.2.

### 5.5.2.1 RESOLUÇÃO PELO MÉTODO DAS 2 SONDAS

Suspendendo provisoriamente o uso do índice  $k$ , para facilitar a escrita, e fazendo  $A_n = D_n + i E_n$ , a Eq. (5-45) dá

$$\begin{aligned} D_n + i E_n &= (X_I + i Y_I) (\cos U_n - i \sin U_n) + (X_R + i Y_R) (\cos U_n + i \sin U_n) = \\ &= X_I \cos U_n + Y_I \sin U_n + X_R \cos U_n - Y_R \sin U_n + \\ & i (-X_I \sin U_n + Y_I \cos U_n + X_R \sin U_n + Y_R \cos U_n) \end{aligned} \quad (5-48)$$

<sup>13</sup> Notar que  $Z_{Rk}$  depende da sonda  $n$ , mas o seu módulo,  $R_k/2$ , não.

ou seja, para  $n = 1$  e  $2$  (duas sondas),

$$D_n = X_I \cos U_n + Y_I \sin U_n + X_R \cos U_n - Y_R \sin U_n \quad (5-49)$$

$$E_n = -X_I \sin U_n + Y_I \cos U_n + X_R \sin U_n + Y_R \cos U_n \quad (5-50)$$

Trata-se, pois, de um sistema linear de 4 equações nas 4 incógnitas  $X_I, Y_I, X_R, Y_R$ .

Faça-se, retomando o uso de  $k$ :

$$U = \cos \alpha_2$$

$$V = \sin \alpha_2$$

com

$$\alpha_1 = 0 \quad \alpha_2 = \frac{2\pi X_{12}}{L_k} \quad (5-51)$$

$L_k$  obtido pela Eq. (2-37), em que  $T$  é substituído por  $T_R/k$

$D_{nk}, E_{nk}$ :  $n = 1, 2$ , provenientes da análise harmónica do sinal na sonda  $n$ , a qual fornece os coeficientes  $a_{nk}$  e  $b_{nk}$ .

De acordo com a "**Relação entre (A-1) e (A-3)**" do **Anexo 1 - Ferramentas Matemáticas**,  $A_n = (a_n - i b_n)/2$ .

Assim, sendo também  $A_{nk} = D_{nk} + i E_{nk}$ , obtém-se

$$D_{nk} = a_{nk}/2 \quad (5-52)$$

$$E_{nk} = -b_{nk}/2 \quad (5-53)$$

O sistema linear de 4 equações nas 4 incógnitas (relembra-se que existe um sistema para cada  $k$ , mas independente da sonda  $n$ ) pode escrever-se na forma matricial seguinte:

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ E_1 \\ D_2 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ U & V & U & -V \\ -V & U & V & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ X_R \\ Y_R \end{bmatrix} \quad (5-54)$$

Obtém-se, assim, para cada harmónica  $k$ , um sistema determinado, donde se podem determinar as incógnitas  $X_I, Y_I, X_R$  e  $Y_R$ .

### 5.5.2.2 RESOLUÇÃO PELO MÉTODO DAS M SONDAS

Com mais do que duas sondas no canal ( $M > 2$ ), obtém-se um sistema sobredimensionado. Neste caso, em geral, o sistema é impossível. Contudo, pode achar-se uma solução aproximada.

O critério a usar na procura da solução aproximada poderá ser, por exemplo, o dos mínimos quadrados, ou seja, a minimização da função  $F_k$ ,

$$F_k = \sum_{n=1}^M \left| A_{nk} - Z_{Ik} e^{-i\alpha_{kn}} - Z_{Rk} e^{i\alpha_{kn}} \right|^2 \quad (5-55)$$

ou seja, suspendendo novamente o uso do índice  $k$ , para facilitar a escrita,

$$F = \sum_{n=1}^M \left| D_n + iE_n - [(X_I + iY_I) \cdot (\cos \alpha_n - i \sin \alpha_n)] - [(X_R + iY_R) \cdot (\cos \alpha_n + i \sin \alpha_n)] \right|^2$$

$$F = \sum_{n=1}^M (D_n - X_I \cos \alpha_n - Y_I \sin \alpha_n - X_R \cos \alpha_n + Y_R \sin \alpha_n)^2 +$$

$$\sum_{n=1}^M (E_n + X_I \sin \alpha_n - Y_I \cos \alpha_n - X_R \sin \alpha_n - Y_R \cos \alpha_n)^2 \quad (5-56)$$

Os valores de  $X_I$ ,  $Y_I$ ,  $X_R$ ,  $Y_R$ , que minimizam a expressão anterior são a solução do sistema

- 1)  $\frac{\partial F}{\partial X_I} = \sum_n [2(D_n - \dots) \cdot (-\cos \alpha_n) + 2(E_n - \dots) \cdot \sin \alpha_n] = 0$
- 2)  $\frac{\partial F}{\partial Y_I} = \sum_n [2(D_n - \dots) \cdot (-\sin \alpha_n) + 2(E_n - \dots) \cdot (-\cos \alpha_n)] = 0$
- 3)  $\frac{\partial F}{\partial X_R} = \sum_n [2(D_n - \dots) \cdot (-\cos \alpha_n) + 2(E_n - \dots) \cdot (-\sin \alpha_n)] = 0$
- 4)  $\frac{\partial F}{\partial Y_R} = \sum_n [2(D_n - \dots) \cdot \sin \alpha_n + 2(E_n - \dots) \cdot (-\cos \alpha_n)] = 0$

Desenvolvendo os 4 parênteses rectos um a um, e suprimindo agora, provisoriamente, o índice  $n$ , obtém-se:

- 1)  $- D \cos \alpha + E \sin \alpha + X_I + X_R \cos 2\alpha - Y_R \sin 2\alpha$
- 2)  $- D \sin \alpha - E \cos \alpha + Y_I + X_R \sin 2\alpha + Y_R \cos 2\alpha$
- 3)  $- D \cos \alpha - E \sin \alpha + X_I \cos 2\alpha + Y_I \sin 2\alpha + X_R$
- 4)  $D \sin \alpha - E \cos \alpha - X_I \sin 2\alpha + Y_I \cos 2\alpha + Y_R$

Introduzindo os somatórios, tem-se:

- 1)  $-\Sigma D \cos \alpha + \Sigma E \sin \alpha + X_I M + X_R \Sigma \cos 2\alpha - Y_R \Sigma \sin 2\alpha = 0$

$$\begin{aligned}
 2) \quad & -\Sigma D \sin \alpha - \Sigma E \cos \alpha + Y_I M + X_R \Sigma \sin 2\alpha + Y_R \Sigma \cos 2\alpha = 0 \\
 3) \quad & -\Sigma D \cos \alpha - \Sigma E \sin \alpha + X_I \Sigma \cos 2\alpha + Y_I \Sigma \sin 2\alpha + X_R M = 0 \\
 4) \quad & \Sigma D \sin \alpha - \Sigma E \cos \alpha - X_I \Sigma \sin 2\alpha + Y_I \Sigma \cos 2\alpha + Y_R M = 0
 \end{aligned}$$

Fazendo, agora,

$$\begin{aligned}
 W &= \Sigma D_n \sin \alpha_n & R &= \Sigma E_n \cos \alpha_n \\
 U &= \Sigma D_n \cos \alpha_n & S &= \Sigma \sin 2\alpha_n \\
 V &= \Sigma E_n \sin \alpha_n & C &= \Sigma \cos 2\alpha_n
 \end{aligned}$$

e sabendo que  $D_n$  e  $E_n$  ( $n = 1, 2, \dots, M$ ) são provenientes da análise harmónica do sinal na sonda  $n$ , Eqs. (5-52) e (5-53), como se viu atrás, resulta o sistema de equações lineares, para cada harmónica  $k$ ,

$$\begin{bmatrix} M & 0 & C & -S \\ 0 & M & S & C \\ C & -S & M & 0 \\ -S & C & 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ X_R \\ Y_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U-V \\ W+R \\ U+V \\ R-W \end{bmatrix} \quad (5-57)$$

o qual, resolvido, fornece a solução aproximada  $[X_I, Y_I, X_R$  e  $Y_R]$  procurada.

### 5.5.3 SEPARAÇÃO DOS ESPECTROS

Retomando o uso do índice  $k$ ,

$$X_n(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} A_{nk} e^{i \frac{2\pi k t}{T}} \quad (5-58)$$

Qualquer programa de análise harmónica fornece, a partir dos valores de  $X_n(t)$ , os números complexos  $A_{nk}$

$$A_{nk} = D_{nk} + i E_{nk} \quad (5-59)$$

$$D_{nk} = \text{Re}(A_{nk}) \quad (5-60)$$

$$E_{nk} = \text{Im}(A_{nk}) \quad (5-61)$$

em que  $\text{Re}(A_{nk})$  e  $\text{Im}(A_{nk})$  são, respectivamente, as componentes reais e imaginárias dos números complexos  $A_{nk}$ .

Obtidos os valores de  $X_{Ik}$ ,  $Y_{Ik}$ ,  $X_{Rk}$ ,  $Y_{Rk}$  por resolução do sistema da Eq. (5-54) - caso do método das 2 sondas - ou do sistema da Eq. (5-57) - caso do método das  $M$  sondas, podem calcular-se finalmente  $I_k$  e  $R_k$ , para cada  $k$ . Tem-se,

$$X_{Ik} + iY_{Ik} \equiv Z_{Ik} = \frac{I_k}{2} e^{i\left(\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi x_1}{L_k} + \theta_k\right)} = \frac{I_k}{2} e^{iW_k} = \frac{I_k}{2} (\cos W_k + i \sin W_k) \quad (5-62)$$

$$X_{Rk} + iY_{Rk} \equiv Z_{Rk} = \frac{R_k}{2} e^{i\left(\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi x_1}{L_k} + \theta_k + \varphi_{nk}\right)} = \frac{R_k}{2} e^{iQ_{nk}} = \frac{R_k}{2} (\cos Q_{nk} + i \sin Q_{nk}) \quad (5-63)$$

calculando-se  $I_k$  e  $R_k$  através de:

$$I_k = \frac{2 X_{Ik}}{\cos W_k} \quad (5-64)$$

$$R_k = \frac{2 X_{Rk}}{\cos Q_{nk}} \quad (5-65)$$

sendo

$$W_k = \arctan \frac{Y_{Ik}}{X_{Ik}} \quad (5-66)$$

$$Q_{nk} = \arctan \frac{Y_{Rk}}{X_{Rk}} \quad (5-67)$$

#### 5.5.4 SÍNTESE NUMÉRICA DOS SINAIS INCIDENTE E REFLECTIDO

Se se quiser sintetizar o sinal incidente e o sinal reflectido, na sonda  $n$ , são também necessários os valores de  $\theta_k$  e  $\varphi_{nk}$ . Estes podem calcular-se da seguinte forma:

$$\theta_k = W_k - \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi x_1}{L_k} \quad (5-68)$$

$$\theta_k + \varphi_{nk} = Q_{nk} - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi x_1}{L_k} \quad (5-69)$$

devendo-se, em seguida, reduzi-los ao intervalo  $(0, 2\pi)$ . A redução de um dado valor calculado ao intervalo  $(0, 2\pi)$  faz-se, se for negativo, somando-lhe  $2\pi$  tantas vezes quantas as necessárias; e se for maior que  $2\pi$ , subtraindo-lhe  $2\pi$  tantas vezes quantas as necessárias.

$A_{nk}$  são números complexos que, para além da forma da Eq. (5-59), podem tomar a forma

$$A_{nk} = d_{nk} e^{i\psi_{nk}} \quad (5-70)$$

com  $d_{nk} = |A_{nk}|$

A  $m_{nk}$  chama-se *fase* de  $A_{nk}$ . Vai-se começar por ver como calcular os valores de  $d_{nk}$ . Isso consegue-se atendendo a que, de acordo com Carvalho, 1973, sendo  $S_n(f)$  o espectro unilateral medido na sonda  $n$ , se tem,

$$\sqrt{2 S_n(f_k) \Delta f} = s_{nk} = 2d_{nk} \quad (5-71)$$

donde, sabendo que  $f_k = k/T_R$  e  $\Delta f = 1/T_R$ ,

$$d_{nk} = \sqrt{\frac{1}{2} S_n\left(\frac{k}{T_R}\right) \cdot \frac{1}{T_R}} \quad (5-72)$$

Por outro lado, se se calcular o chamado espectro cruzado de fases entre os sinais das sondas  $1$  e  $n$ , este dá, para cada frequência, a diferença de fase,  $\delta m_{1n}$ , entre os  $A_{1k}$  e  $A_{nk}$ . Logo, admitindo que é conhecida a fase  $m_{1k}$ , é fácil obter as outras.

Para calcular  $m_{1k}$ , pode usar-se a análise harmónica, como indicado atrás.

### 5.5.5 ESPECTROS INCIDENTE E REFLECTIDO

Quando são geradas ondas irregulares, para além de (ou em vez de) considerar os sinais incidente e reflectido, pode interessar considerar os espectros incidente e reflectido.

Conhecidos  $I_k$  e  $R_k$ , o *espectro incidente*,  $S_{inc}(f)$ , e o *espectro reflectido*,  $S_{ref}(f)$ , são estimados, de acordo com Carvalho, 1973, através das seguintes fórmulas:

$$S_{inc}\left(\frac{k}{T_R}\right) = T_R \frac{I_k^2}{2} \quad (5-73)$$

$$S_{ref}\left(\frac{k}{T_R}\right) = T_R \frac{R_k^2}{2} \quad (5-74)$$

Estas estimativas não são, no entanto, de boa qualidade; trata-se apenas dos chamados *espectros da amostra*, que poderão ser *alisados* pelas técnicas descritas em Carvalho, 1973.

Ter-se-á, utilizando  $S_{inc}$  e  $S_{ref}$  das Eqs. (5-73) e (5-74), e substituindo, para facilitar a escrita, o argumento  $\frac{k}{T_R}$  pelo índice  $k$ ,

$$S_{i_k} = \frac{1}{T_R} \left[ S_{inc_0} Q_k + \sum_{m=1}^c S_{inc_m} (Q_{k-m} + Q_{k+m}) \right] \quad (5-75)$$

$$S_{r_k} = \frac{1}{T_R} \left[ S_{ref_0} Q_k + \sum_{m=1}^c S_{ref_m} (Q_{k-m} + Q_{k+m}) \right] \quad (5-76)$$

sendo  $c = \frac{f_c}{\Delta f} = T_R f_c$  (5-77)

$$Q_k = \frac{3}{4} T_M \left[ \frac{\sin \frac{\pi k T_M}{2 T_R}}{\frac{\pi k T_M}{2 T_R}} \right]^4 \quad (5-78)$$

$S_{i_k}$  - o espectro incidente alisado na frequência  $k/T_R$ ;

$S_{r_k}$  - o espectro reflectido alisado na frequência  $k/T_R$ ;

$f_c$  - a frequência de corte ou máxima do espectro;

$Q_k$  - a janela espectral de Parzen na frequência  $k/T_R$ ;

$T_M$  - a semi-largura da janela temporal.

### 5.5.6 COEFICIENTE DE REFLEXÃO

O coeficiente de reflexão é, por sua vez, calculado pelos métodos usuais. A definição de coeficiente de reflexão,  $r$ , para ondas regulares, isto é, sinusoidais, é conhecida e simples:

$$r = \frac{H_R}{H_I} \quad (5-79)$$

em que  $H_R$  e  $H_I$  são as alturas de onda respectivamente reflectida e incidente. O método usual de cálculo envolve o uso de um registo feito por uma sonda que se desloca ao longo de um carril. Do registo efectuado, que não é uma sinusóide, em virtude de o sinal sinusoidal incidente aparecer somado ao sinal reflectido, extraem-se os valores  $H_{max}$  e  $H_{min}$ , alturas máxima e mínima, respectivamente, e obtém-se o coeficiente de reflexão,  $r$ , pela expressão:

$$r = \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{max} + H_{min}} \quad (5-80)$$



Para o caso das *ondas irregulares*, o coeficiente de reflexão pode ser calculado por uma das seguintes expressões:

- a) O coeficiente de reflexão de cada uma das harmónicas

$$r_k = \frac{R_k}{I_k} \quad (5-81)$$

- b) O coeficiente de reflexão a partir das energias reflectida e incidente

$$r_0 = \sqrt{\frac{m_{0R}}{m_{0I}}} \quad (5-82)$$

em que  $m_{0R}$  e  $m_{0I}$  são os integrais, Eq. (2-12), dos espectros reflectido e incidente, respectivamente.

- c) A função coeficiente de reflexão a partir dos espectros reflectido e incidente, das Eqs. (5-73) e (5-74).

$$r(f) = \sqrt{\frac{S_{ref}(f)}{S_{inc}(f)}} \quad (5-83)$$

### 5.5.7 ALTURA SIGNIFICATIVA

A altura significativa referente à agitação incidente e reflectida, pode ser calculada, adaptando a Eq. (2-13), da seguinte forma:

$$H_I = 4\sqrt{m_{0I}} \quad (5-84)$$

$$H_R = 4\sqrt{m_{0R}} \quad (5-85)$$

Goda, 1985, apresenta uma outra forma de cálculo da altura significativa das componentes incidente e reflectida:

$$H_I = \frac{H_S}{\sqrt{1+r_0^2}} \quad (5-86)$$

$$H_R = \frac{r_0 H_S}{\sqrt{1+r_0^2}} \quad (5-87)$$

Nestas fórmulas,  $r_0$  é o coeficiente de reflexão da Eq. (5-82) e  $H_S$  é a altura significativa numa das sondas calculada através da utilização do método directo, ou seja, pela utilização directa das alturas de onda do sinal registado numa dada sonda.

### 5.5.8 DISPOSIÇÃO DAS SONDAS

As distâncias que separam as sondas umas das outras não são arbitrárias, como se vai ver. No caso da utilização de **2 sondas**, para o problema se poder resolver, é preciso que o sistema (5-54) tenha determinante não nulo:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ U & V & U & -V \\ -V & U & V & U \end{vmatrix} \neq 0 \quad (5-88)$$

ou seja,

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ V & U & -V \\ U & V & U \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ U & V & -V \\ -V & U & U \end{vmatrix} = 4V^2 \neq 0 \quad (5-89)$$

ou seja,

$$V \neq 0 \text{ ou, ainda, } \sin \alpha_2 \neq 0$$

Logo,

$$\alpha_2 \neq 0, \pi, 2\pi, \dots, j\pi, \dots$$

e, por isso,

$$\frac{2\pi x_{12}}{L_k} \neq j\pi, j = 0, 1, 2, \dots$$

$$x_{12} \neq \frac{L_k}{2}$$

isto é, a distância entre as duas sondas não pode ser múltipla de meio comprimento de onda (e isto para cada harmónica significativa).

Para  $M$  sondas, o problema é idêntico, isto é, as distâncias que separam as  $M$  sondas devem ser tais que o determinante da matriz quadrada do sistema (5-57) seja diferente de zero, ou seja, que se tenha:

$$\begin{vmatrix} M & 0 & C & -S \\ 0 & M & S & C \\ C & S & M & 0 \\ -S & C & 0 & M \end{vmatrix} \neq 0 \quad (5-90)$$

isto é,

$$M^4 + C^4 - S^4 - 2C^2M^2 \neq 0 \quad (5-91)$$

Logo,  $(M^2 - C^2)^2 - S^4 = 0$

ou seja,  $C^2 + S^2 = M^2$ , com  $S = \sum \sin 2\alpha_i$ ;  $C = \sum \cos 2\alpha_i$

Considerem-se então os seguintes casos particulares:

Para **3 sondas**:

$$M^2 = 9;$$

$$S^2 = (\sin 2\alpha_1 + \sin 2\alpha_2 + \sin 2\alpha_3)^2$$

$$C^2 = (\cos 2\alpha_1 + \cos 2\alpha_2 + \cos 2\alpha_3)^2$$

$$C^2 + S^2 = 3 + 2 [\cos 2(\alpha_3 - \alpha_2) + \cos 2\alpha_2 + \cos 2\alpha_3] \neq 9$$

ou

$$\cos 2(\alpha_3 - \alpha_2) + \cos 2\alpha_2 + \cos 2\alpha_3 \neq 3 \quad (5-92)$$

Esta desigualdade tem infinitas soluções. O procedimento mais adequado, neste caso, consiste, portanto, em escolher previamente distâncias entre as sondas e verificar se a condição é cumprida para cada uma das harmônicas significativas. No caso de não o ser, devem ser alteradas as distâncias até que o seja.

Para **M sondas**, a condição é:

$$\sum_{i,j} \cos 2(\alpha_i - \alpha_j) + \sum_{m=2}^M \cos 2\alpha_m \neq 1 + 2 + 3 + \dots + M - 1 \quad (5-93)$$

onde  $i, j$  são as combinações de  $\{2, 3, 4, \dots, M\}$  de 2 a 2.

Notar que  $C_2^1 = 0$ .

$$\text{Com efeito, } C_k^n = \frac{n!}{k!(n-k)!} \rightarrow C_2^1 = \frac{1!}{2!(-1)!}.$$

Ora,  $n! = \Gamma(n+1) = n \Gamma(n) \Rightarrow (-1)! = \Gamma(0) = \Gamma(1)/0 = 1/0 = \infty$ , o que leva a:  $C_2^1 = \frac{1}{\infty} = 0$

Goda, 1985, recomenda que as distâncias das sondas quer a eventuais modelos em ensaio, quer ao bater de ondas, sejam superiores a um comprimento de onda das alturas significativas calculadas nas posições das sondas. Tanto a condição da Eq. (5-93), como as recomendações de Goda, estão presentes no módulo de reconstituição dos espectros incidente e reflectido **SAM MOD 8 (Análise da Reflexão)**.

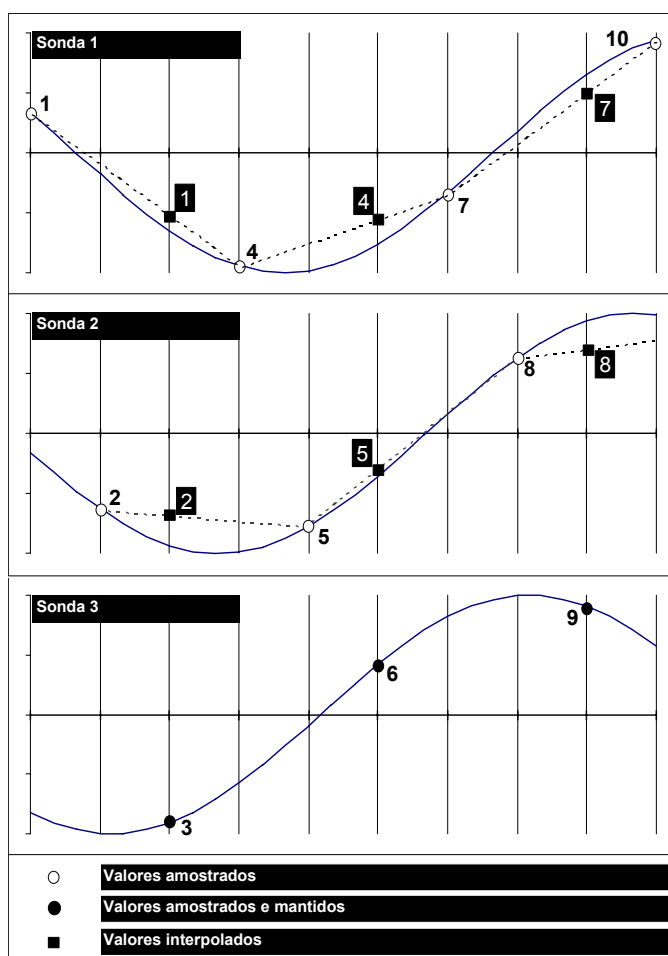
### 5.5.9 SIMULTANEIDADE DOS REGISTOS POR INTERPOLAÇÃO

Por vezes, pode ser necessário que o dispositivo de recolha de dados de que se dispõe faça amostragens sequenciais em sondas diferentes. Nessas circunstâncias, o primeiro valor amostrado respeita à primeira sonda, o segundo à segunda, o terceiro à terceira, etc., até que, havendo  $M$  sondas, o  $(M+1)^{\circ}$  valor respeita de novo à primeira sonda, e assim sucessivamente.

Em consequência disto, os valores obtidos nas diferentes sondas não são simultâneos, o que, se não for corrigido, poderá introduzir ligeiras incorrecções nos cálculos. Por isso, por um lado, é preciso separar os valores obtidos, para os atribuir às sondas respectivas, e, por outro lado, é preciso fazer interpolações a partir desses valores, para obter valores que se possam considerar simultâneos (Fig. 5-9).

Na Fig. 5-9, estão representados:

- os valores amostrados nas *Sondas 1 e 2*;
- os valores amostrados e mantidos na *Sonda 3*;
- os valores a obter nas *Sondas 1 e 2*, por interpolação.



**Fig. 5-9 - Interpolação de valores dos sinais nas sondas**

Para obter simultaneidade, vai-se, por exemplo, determinar, nos dois primeiros registos, valores nos instantes em que há valores no terceiro registo. Usar-se-á a interpolação linear, dado que  $\delta t$  é pequeno (a frequência de aquisição,  $f_a$ , é geralmente de 15 Hz, ou seja,  $\delta t = 0.0667$  s).

Designando por  $y(t)$  o sinal ocorrido numa das sondas, tem-se

$$\frac{y(t) - y(t_s)}{t - t_s} = \frac{y(t_{s+1}) - y(t_s)}{t_{s+1} - t_s} \quad (5-94)$$

em que  $y(t)$  é um valor a interpolar no instante  $t \in (t_s, t_{s+1})$  e  $t_s$  e  $t_{s+1}$  são instantes sucessivos em que há valores observados.

E vem

$$y(t) = \frac{y(t_{s+1}) - y(t_s)}{t_{s+1} - t_s} (t - t_s) + y(t_s) \quad (5-95)$$

ou, de forma simplificada evidente,

$$y = \frac{y_{s+1} - y_s}{t_{s+1} - t_s} (t - t_s) + y_s \quad (5-96)$$

Assim, para a *Sonda 1*, vem

$$y = y_s + 2 \Delta t \frac{y_{s+1} - y_s}{3 \Delta t} \quad (5-97)$$

ou, ainda,

$$y = y_s + \frac{2}{3} (y_{s+1} - y_s) \quad (5-98)$$

e, analogamente para a *Sonda 2*,

$$y = y_s + \frac{1}{3} (y_{s+1} - y_s) \quad (5-99)$$

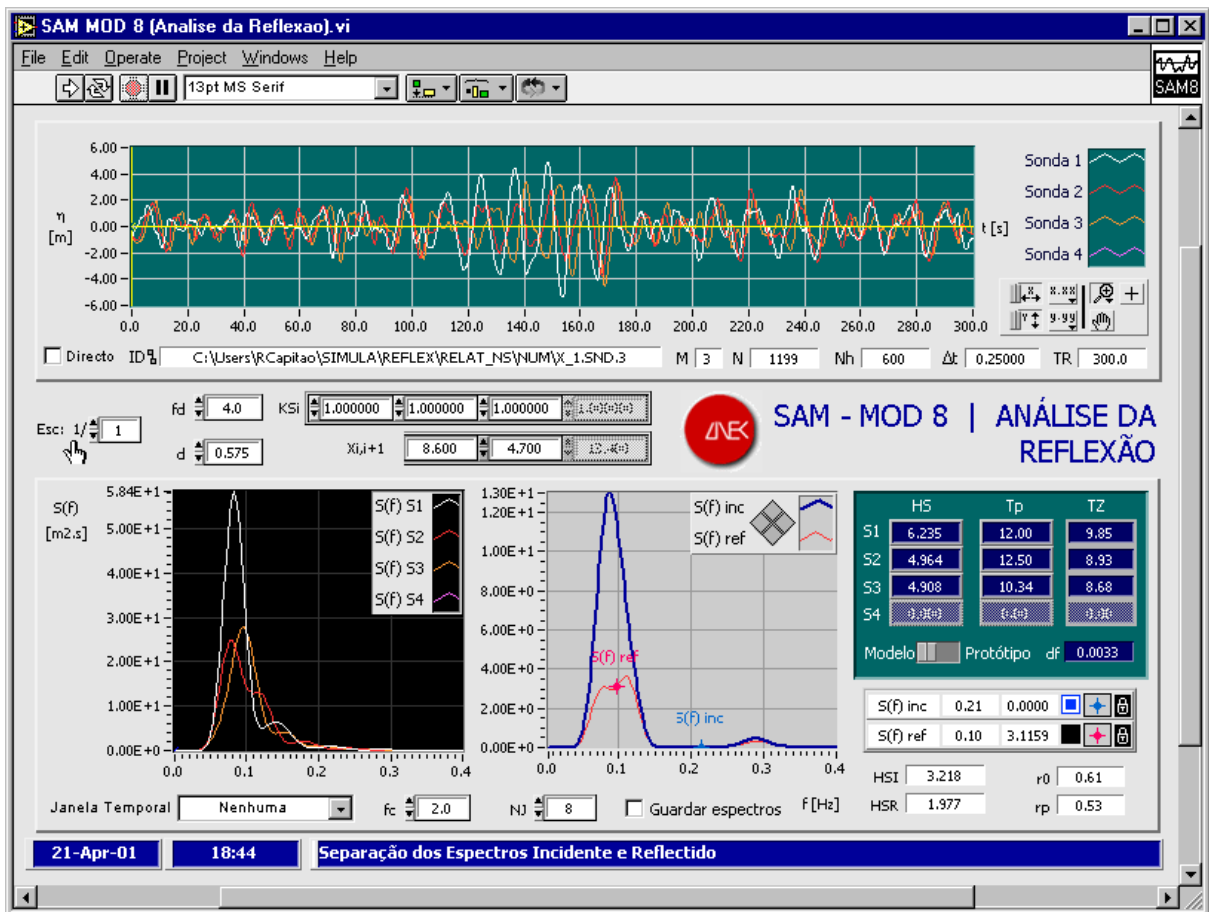
No caso de duas sondas, obtêm-se para o primeiro registo pontos interpolados para os instantes em que há pontos no segundo registo pela fórmula

$$y = y_s + \frac{1}{2} (y_{s+1} - y_s) \quad (5-100)$$

Também este algoritmo de obtenção de simultaneidade em diversas sondas está previsto no pacote de *software SAM - SAM MOD 8 (Análise da Reflexão)*, embora, actualmente, não seja necessário proceder à referida correcção.

5.5.10 ALGORITMO DE CÁLCULO

Para implementar o método descrito de separação da agitação incidente e reflectida através dos sinais de várias sondas, numa primeira fase generalizou-se o programa de computador, designado REFLEX, escrito em linguagem de programação Pascal no âmbito deste trabalho, e, numa segunda fase, integrou-se este programa em ambiente LabVIEW consolidando o módulo SAM MOD 8 (Análise da Reflexão) do pacote de software SAM descrito na Parte III deste trabalho. Um exemplo dos resultados da separação de espectros incidente e reflectido obtido com este módulo é mostrado na Fig. 5-10.



**Fig. 5-10 - Exemplo dos resultados da separação de espectros incidente e reflectido obtidos com o módulo SAM MOD 8 (Análise da Reflexão)**

Os procedimentos para a determinação dos espectros incidente e reflectido e para a caracterização global da reflexão são os seguintes:

- Faz-se a análise harmónica dos sinais obtidos em cada uma das  $M$  sondas. A análise harmónica fornece as constantes  $\{a_{nk}\}$  e  $\{b_{nk}\}$ , da Eq. (A-1) do **Anexo 1 - Ferramentas Matemáticas**, a partir das quais se obtêm  $\{D_{nk}\}$  e  $\{E_{nk}\}$ , usando as Eqs. (5-52) e (5-53).

- Com estas constantes, e com os valores,  $x_{1n}$ , da distância da primeira sonda à última (Fig. 5-8), e os períodos harmônicos, constrói-se, para cada harmónica,  $k$ , o sistema Eq. (5-54) - caso do método das 2 sondas - ou o sistema da Eq. (5-57) - caso do método das  $M$  sondas.
- Resolvido o sistema anterior, cuja solução é  $X_I, Y_I, X_R, Y_R$ , para cada  $k$ , obtêm-se  $I_k, R_k, \theta_k$  e  $\varphi_{nk}$  pelas fórmulas (5-64), (5-65), (5-68) e (5-69), respectivamente.
- Obtêm-se as estimativas do espectro incidente e reflectido, pelas fórmulas (5-73) e (5-74), e, eventualmente, procede-se ao seu alisamento, fórmulas (5-75) e (5-76).
- Efectua-se a caracterização da reflexão através da utilização das fórmulas (5-81), (5-82) e (5-83), que fornecem, respectivamente, com base nos espectros incidente e reflectido, os coeficientes de reflexão  $r_k, r_0$  e  $r(f)$ .

#### 5.5.11 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Nesta e na próxima secções pretende-se ilustrar o modo como é feita a reconstituição dos espectros incidente e reflectido utilizando, respectivamente, o *método das 2 sondas* e o *método das  $M$  sondas*.

Para a simulação dos sinais, foi utilizado o módulo **SAM MOD 1-1 (Simulação Base Espectro)** do pacote de *software SAM*, descrito na Parte III, o qual permite, quer a utilização de um ficheiro contendo as ordenadas do espectro, quer a criação das ordenadas do espectro de acordo com algumas fórmulas de espectros empíricos. Presentemente, é possível a utilização dos espectros empíricos JONSWAP, Pierson-Moskowitz ITTC e Pierson-Moskowitz generalizado (ver **Anexo 2 - Definição de Espectros Empíricos**).

Para as simulações numéricas, as fórmulas que dão os sinais a analisar nas sondas são as Eqs. (5-25) a (5-27), em que:

- $N$ , o número de sinusóides de definição do espectro, é geralmente de cerca de 200;
- os valores  $I_k$  são calculados, a partir do espectro dado, pela Eq. (5-72), com  $I_k = d_{nk}$ ;
- o valor  $R_k$  é calculado por  $R_k = Cr \cdot I_k$ , em que  $Cr$  é o *coeficiente de reflexão arbitrado* para o obstáculo;
- $T_R$ , a duração do registo, é geralmente de cerca de 3 minutos, o que a uma escala de 1/50, vulgar num ensaio em canal, corresponde a  $3\sqrt{50} = 21.2$  minutos na natureza;
- $x_{11}, x_{12}$  e  $x_{1n}$  têm o significado já indicado na Fig. 5-8;
- o comprimento de onda  $L_k$  é calculado pelas Eqs. (2-33) ou (2-37), considerando o período  $T = T_R/k$  e a profundidade  $d$  da água;
- as fases  $\theta_k$  são aleatórias, uniformemente distribuídas em  $(0, 2\pi)$ ;

- as fases  $\varphi_{1k}$ ,  $\varphi_{2k}$  e  $\varphi_{nk}$  são calculadas pela Eq. (5-69).

A verificação dos cálculos numéricos é efectuada através do cálculo do *grau de coincidência do espectro incidente calculado (alisado) com o espectro incidente inicial* e da *comparação dos coeficientes de reflexão* obtidos,  $r_k$  e  $r_o$ , com o coeficiente  $Cr$  arbitrado.

Assim, seguindo a metodologia descrita em 5.5.10, faz-se, em seguida, a análise harmónica de cada um dos sinais simulados de acordo com o acima mencionado (somadas dos sinais incidente e reflectido de acordo com as expressões das Eqs. (5-25) e (5-27)) e, finalmente, aplica-se um método de reconstituição dos espectros, utilizando o método das 2 sondas ou o método das  $M$  sondas.

#### 5.5.11.1 SIMULAÇÃO COM 2 SONDAS

Usa-se nesta secção o *método das 2 sondas* para um exemplo de simulação numérica em que se optou por considerar sinais com características de duração, altura e período idênticos, mas obtidos mediante a utilização de espectros empíricos diferentes. Arbitrou-se um valor de coeficiente de reflexão constante  $Cr = 40\%$ . Fez-se também uma simulação numérica com  $Cr = 80\%$ .

Os dados para a simulação numérica foram os apresentados no Quadro 5-2.

**Quadro 5-2 - Dados da Simulação Numérica - Método das 2 sondas**

|   |           |
|---|-----------|
| Duração do sinal (s) - $T_R$                              | 300       |
| Intervalo de digitalização (s) - $\Delta t$               | 0.25      |
| Coefficiente (constante) de reflexão do obstáculo - $Cr$  | 0.4 e 0.8 |
| Número de sinusóides - $N$                                | 300       |
| Distância entre o batedor e objecto reflector (m) - $dbo$ | 36.2      |
| Distância entre o batedor e a sonda 1 (m) - $x1$          | 8.6       |
| Distância entre a sonda 1 e a sonda 2 (m) - $x12$         | 4.7       |
| Profundidade (m) - $d$                                    | 0.575     |

De referir que nestas simulações numéricas os dados utilizados referentes às características físicas do canal (parâmetros  $dbo$ ,  $x1$ ,  $x12$  e  $d$ ) foram idênticos aos que serão considerados nas simulações físicas, em canal, de que se dará conta em 5.5.12.2.

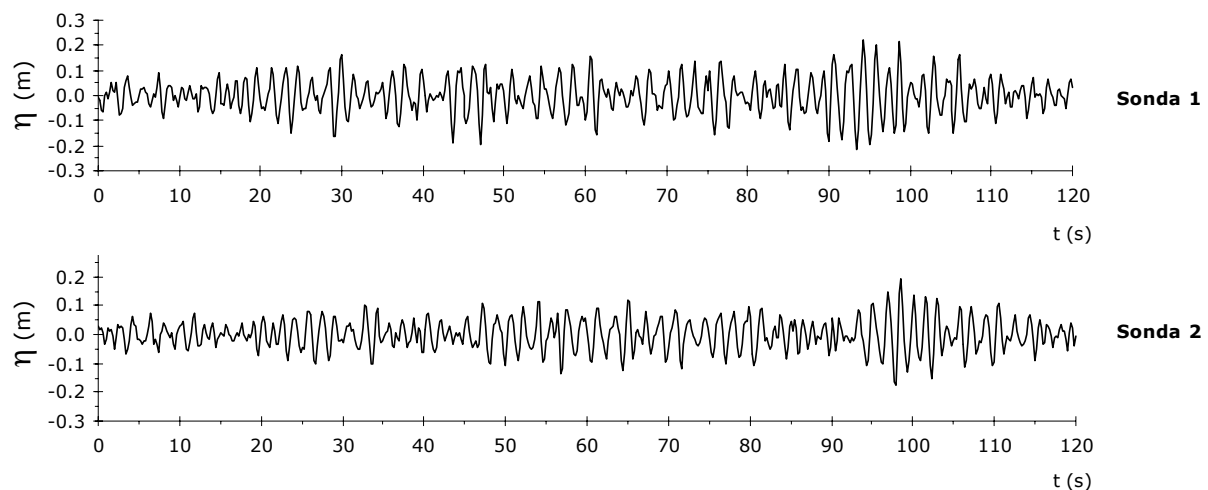
Para o cálculo dos espectros empíricos (JONSWAP, Pierson-Moskowitz ITTC e Pierson-Moskowitz generalizado), foram considerados os parâmetros, já reduzidos à escala arbitrada de 1/50, e os quatro casos de simulação numérica referidos no Quadro 5-3.



**Quadro 5-3 - Casos de Simulação Numérica - Método das 2 sondas**

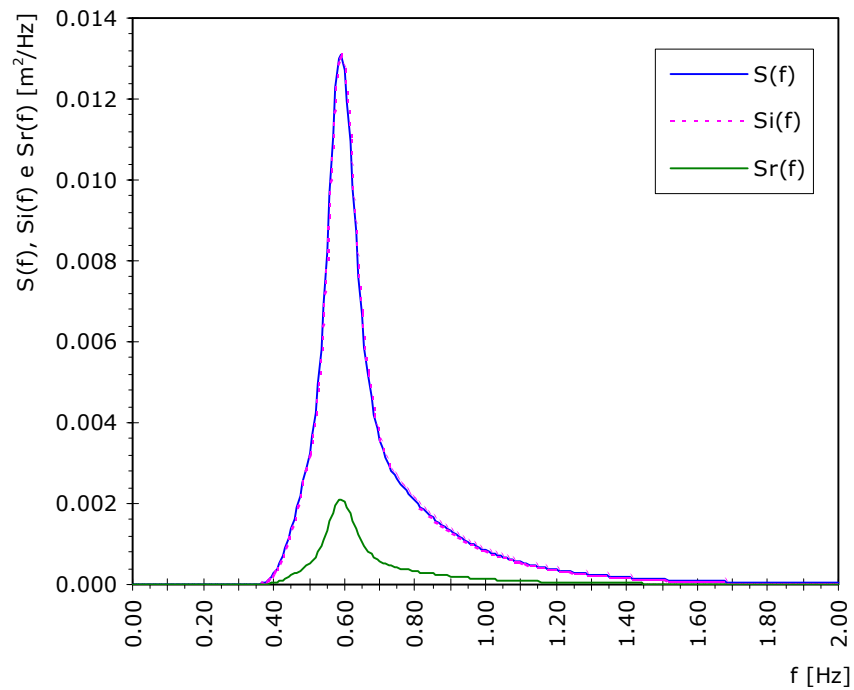
|   |  |
|---|--|
| Altura Significativa (m) - $H_S$        | 0.2  |
| Período de Pico do Espectro (s) - $T_p$ | 1.7  |
| Caso <b>N1-S2</b> <sup>14</sup>         | Espectro JONSWAP, $\gamma = 3.3$ , $Cr = 40\%$ |
| Caso <b>N2-S2</b>                       | Pierson-Moskowitz ITTC, $Cr = 40\%$            |
| Caso <b>N3-S2</b>                       | Pierson-Moskowitz generalizado, $Cr = 40\%$    |
| Caso <b>N4-S2</b>                       | Espectro JONSWAP, $\gamma = 3.3$ , $Cr = 80\%$ |

Para os quatro casos de simulação numérica (**N1-S2** a **N4-S2**)<sup>14</sup>, são apresentados, sucessivamente, da Fig. 5-12 à Fig. 5-15, os espectros do sinal inicial e dos sinais incidente e reflectido reconstituídos (e alisados) obtidos pelo método das 2 sondas. Antes, na Fig. 5-11, é apresentado um excerto de um dos gráficos dos sinais nas sondas (soma das componentes incidente e reflectida) para o caso **N1-S2**. Estes gráficos foram produzidos através do programa de computador REFLEX, atrás referido. Note-se, no entanto, que este programa está agora integrado no módulo SAM MOD 8 (Análise da Reflexão) do pacote de software SAM, pelo que os referidos gráficos podem também ser obtidos por este módulo mais actual (ver exemplo na Fig. 5-10).

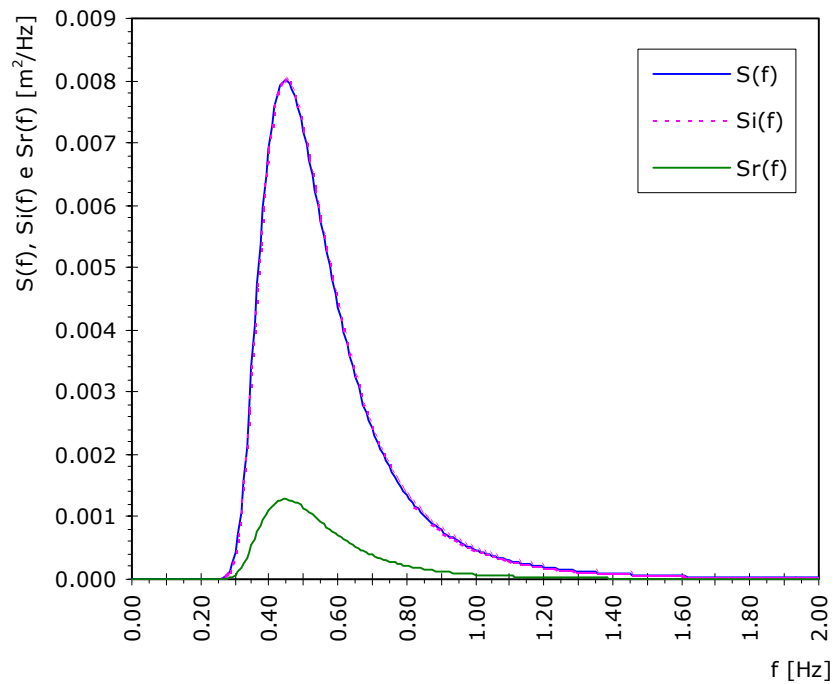


**Fig. 5-11 - Excerto dos sinais simulados numericamente nas duas sondas para o Caso N1-S2 - JONSWAP,  $Cr = 40\%$**

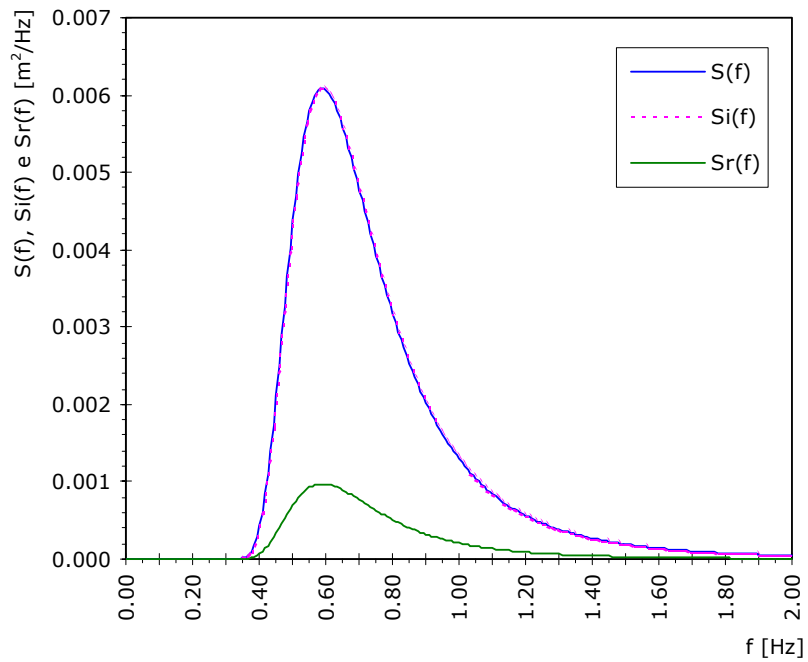
<sup>14</sup> As siglas têm o seguinte significado: **N1-S2** designa a 1ª simulação numérica (**N1**) com 2 sondas (**S2**), **N2-S2** é a 2ª simulação numérica (**N2**) com 2 sondas (**S2**), etc.



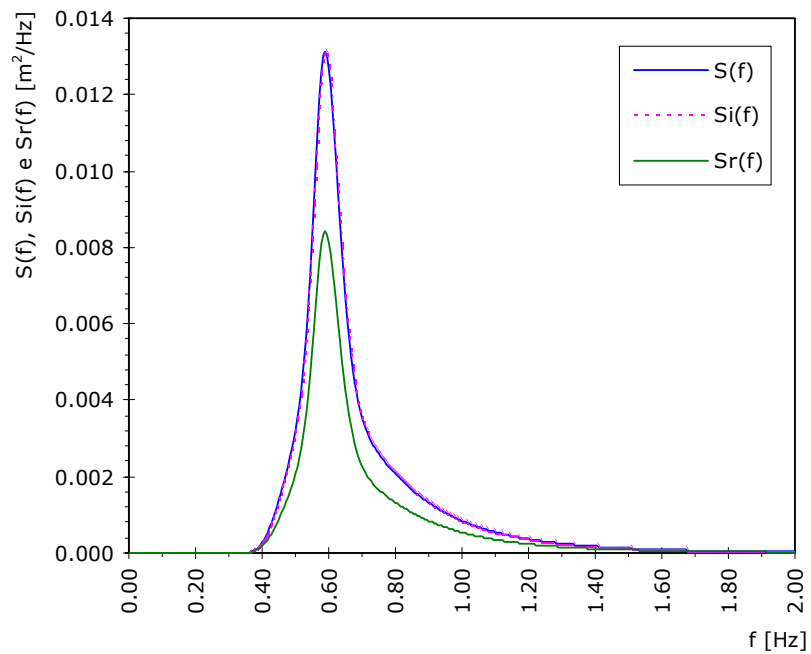
**Fig. 5-12 - Espectro incidente inicial ( $S$ ) e espectros incidente ( $S_i$ ) e refletido ( $S_r$ ) reconstituídos (alisados) para o Caso N1-S2 - JONSWAP,  $Cr = 40\%$**



**Fig. 5-13 - Espectro incidente inicial ( $S$ ) e espectros incidente ( $S_i$ ) e refletido ( $S_r$ ) reconstituídos (alisados) para o Caso N2-S2 - Pierson-Moskowitz ITTC,  $Cr = 40\%$**



**Fig. 5-14 - Espectro incidente inicial ( $S$ ) e espectros incidente ( $Si$ ) e refletido ( $Sr$ ) reconstituídos (alisados) para o Caso N3-S2 - Pierson-Moskowitz generalizado,  $Cr = 40\%$**



**Fig. 5-15 - Espectro incidente inicial ( $S$ ) e espectros incidente ( $Si$ ) e refletido ( $Sr$ ) reconstituídos (alisados) para o Caso N4-S2 - JONSWAP,  $Cr = 80\%$**

Como exemplo dos resultados numéricos, apresenta-se no Quadro A-3 do **Anexo 4 - Simulação Numérica** um extracto dos resultados da análise da reflexão para o caso **N1-S2**, contendo, para a frequência da sinusóide  $k$ ,

- os valores das ordenadas do espectro incidente inicial ( $S$ );
- do espectro incidente reconstituído alisado ( $S_i$ ), obtido pela Eq. (5-75);
- do espectro reflectido reconstituído alisado ( $S_r$ ), obtido pela Eq. (5-76) e, finalmente;
- o coeficiente de reflexão  $r_k$ , obtido pela Eq. (5-81).

Na última linha do Quadro A-3, é apresentado o coeficiente  $r_0$  calculado através da relação entre os momentos de ordem zero dos espectros reflectido e incidente alisados reconstituídos, Eq. (5-82).

#### 5.5.11.2 SIMULAÇÃO COM 3 SONDAS

Desta vez, usou-se o *método das M sondas* e consideraram-se simulações numéricas com os espectros empíricos de JONSWAP, Pierson-Moskowitz (ITTC) e Pierson-Moskowitz generalizado. Consideraram-se também sinais simulados com as mesmas características de duração, alturas significativas e períodos de pico de espectro, mas obtidos mediante a utilização de espectros empíricos diferentes. Igualmente, tal como na secção anterior, para o caso do método das 2 sondas, arbitraram-se valores de coeficiente de reflexão do obstáculo constante,  $Cr = 40\%$  e  $80\%$ . Em resumo, os dados para a simulação numérica foram os que constam do Quadro 5-4.

**Quadro 5-4 - Dados da Simulação Numérica - Método das  $M (=3)$  sondas**

|   |           |
|---|-----------|
| Duração do sinal (s) - $T_R$                              | 180       |
| Intervalo de digitalização (s) - $\Delta t$               | 0.25      |
| Coeficiente de reflexão do obstáculo - $Cr$               | 0.4 e 0.8 |
| Número de sinusóides - $N$                                | 360       |
| Distância entre o batedor e objecto reflector (m) - $dbo$ | 36.2      |
| Distância entre o batedor e a sonda 1 (m) - $x1$          | 8.70      |
| Distância entre a sonda 1 e a sonda 2 (m) - $x12$         | 4.27      |
| Distância entre a sonda 1 e a sonda 3 (m) - $x13$         | 8.30      |
| Profundidade (m) - $d$                                    | 0.72      |

De referir igualmente que nestas simulações numéricas os dados utilizados referentes às características físicas do canal (parâmetros  $dbo$ ,  $x1$ ,  $x12$ ,  $x13$  e  $d$ ) foram idênticos aos que vão ser usados nas simulações físicas, em 5.5.12.3.

Consideraram-se os seguintes parâmetros e casos do Quadro 5-5.

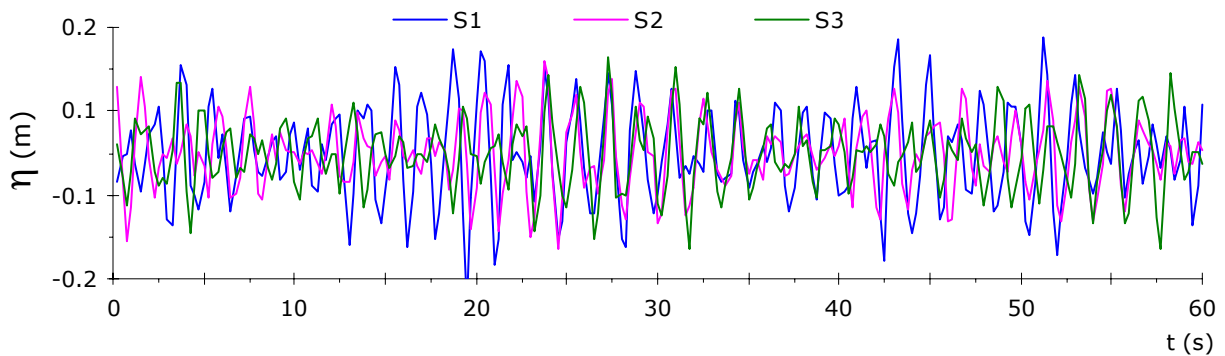
**Quadro 5-5 - Casos de Simulação Numérica - Método das  $M (=3)$  sondas**

|   |  |
|---|--|
| Altura Significativa (m) - $H_s$        | 0.15   |
| Período de Pico do Espectro (s) - $T_p$ | 1.7  |
| Caso <b>N1-S3</b>                       | Espectro JONSWAP, $\gamma = 3.3$ , $Cr = 40\%$       |
| Caso <b>N2-S3</b>                       | Espectro Pierson-Moskowitz (ITTC), $Cr = 40\%$       |
| Caso <b>N3-S3</b>                       | Espectro Pierson-Moskowitz generalizado, $Cr = 40\%$ |
| Caso <b>N4-S3</b>                       | Espectro JONSWAP, $\gamma = 3.3$ , $Cr = 80\%$       |

Na Fig. 5-16 mostra-se, como exemplo, um gráfico com um excerto dos sinais (soma das componentes incidente e reflectida) nas três sondas para o caso **N1-S3**.

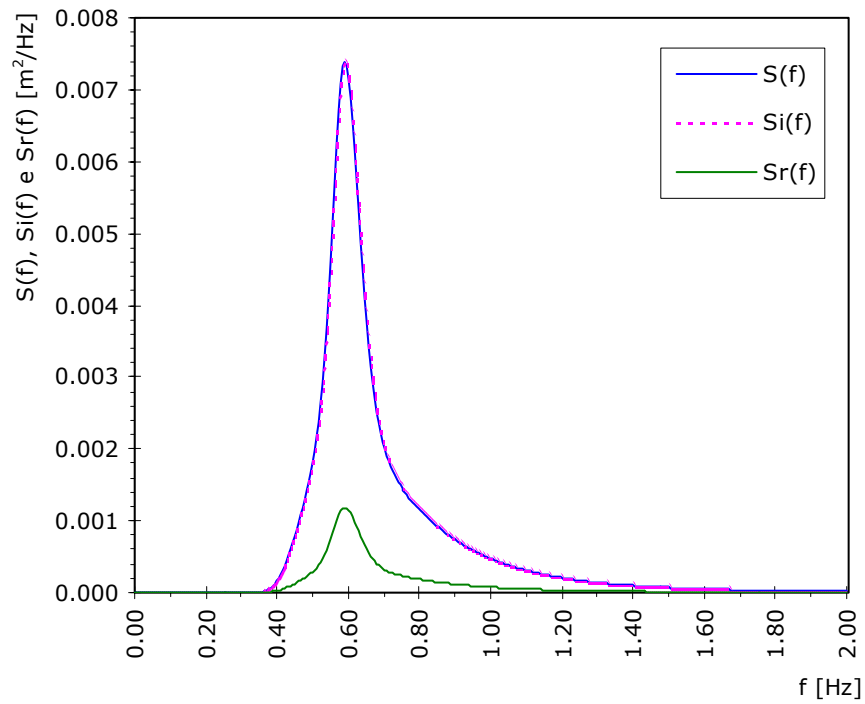
Da Fig. 5-17 à Fig. 5-20 podem ver-se os gráficos dos espectros reconstituídos (alisados) dos sinais incidente e reflectido para os quatro casos de simulação numérica (**N1-S3** a **N4-S3**)<sup>15</sup> considerados.

No Quadro A-4 do **Anexo 4 - Simulação Numérica**, apresenta-se um extracto das ordenadas dos espectros  $S$ ,  $S_i$  - obtido pela Eq. (5-75),  $S_r$  - obtido pela Eq. (5-76), e, finalmente  $r_k$  - obtido pela Eq. (5-81), referente ao caso **N1-S3**. Na última linha do quadro é apresentado  $r_o$ , dado pela Eq. (5-82).

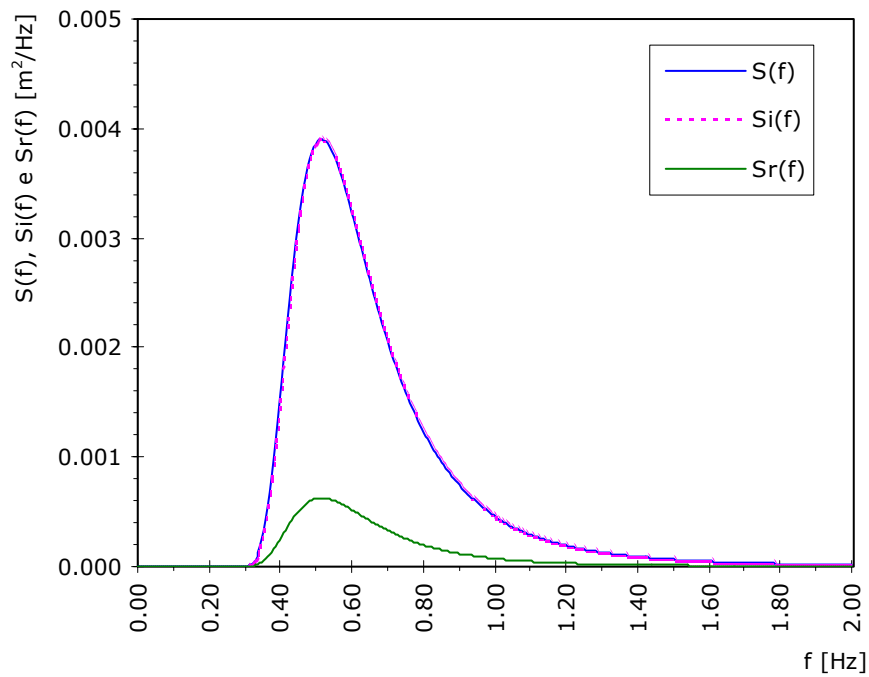


**Fig. 5-16 - Excerto dos primeiros 60 s dos sinais simulados numericamente nas sondas S1, S2 e S3 - Caso N1-S3 - JONSWAP,  $Cr = 40\%$**

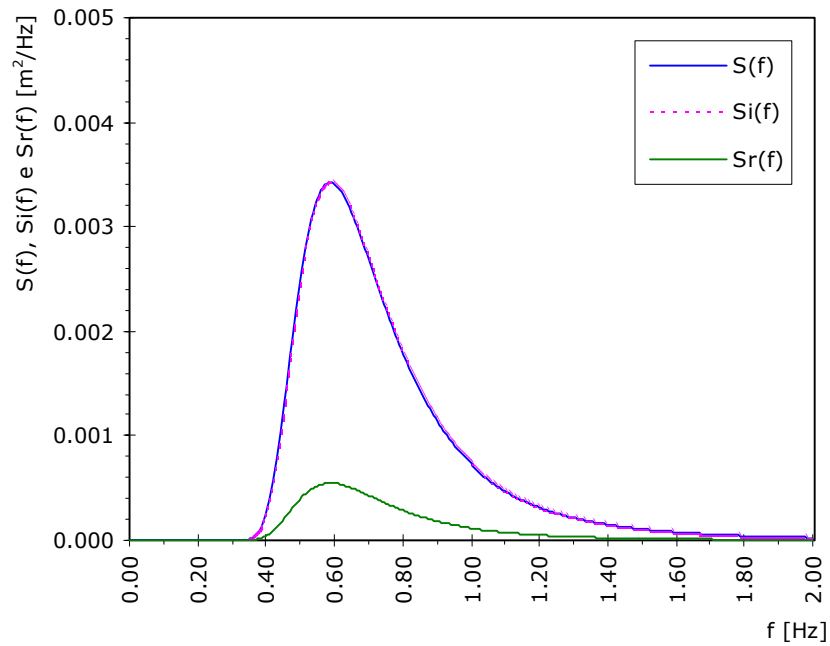
<sup>15</sup> **N1-S3** significa 1ª simulação numérica com 3 sondas, **N2-S3** significa 2ª simulação numérica com 3 sondas, etc.



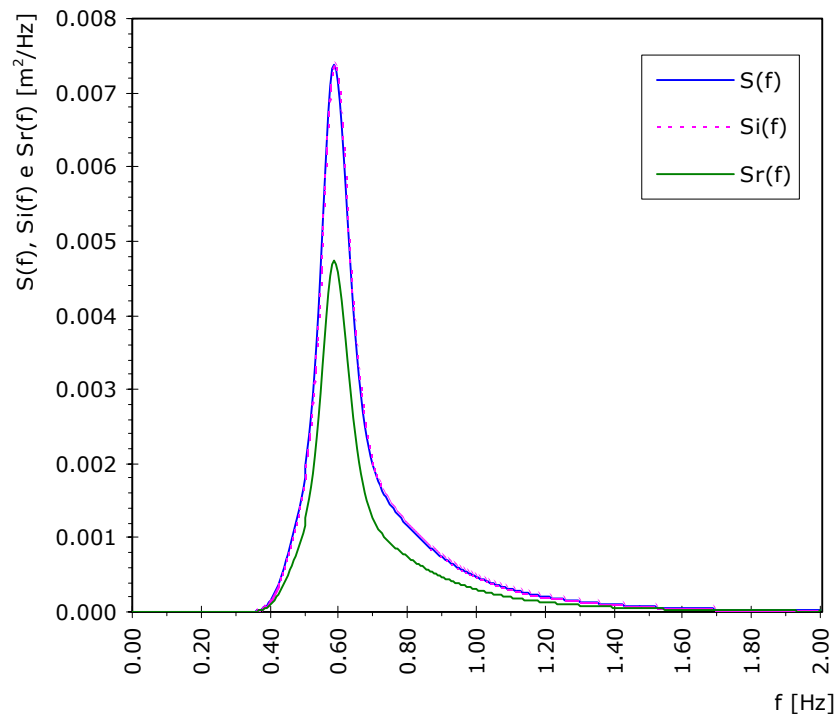
**Fig. 5-17 - Espectro incidente inicial ( $S$ ) e espectros incidente ( $S_i$ ) e refletido ( $S_r$ ) reconstituídos (alisados) para o Caso N1-S3 - JONSWAP,  $Cr = 40\%$**



**Fig. 5-18 - Espectro incidente inicial ( $S$ ) e espectros incidente ( $S_i$ ) e refletido ( $S_r$ ) reconstituídos (alisados) para o Caso N2-S3 - Pierson-Moskowitz ITTC,  $Cr = 40\%$**



**Fig. 5-19 - Espectro incidente inicial ( $S$ ) e espectros incidente ( $S_i$ ) e refletido ( $S_r$ ) reconstituídos (alisados) para o Caso N3-S3 - Pierson-Moskowitz generalizado,  $Cr = 40\%$**



**Fig. 5-20 - Espectro incidente inicial ( $S$ ) e espectros incidente ( $S_i$ ) e refletido ( $S_r$ ) reconstituídos (alisados) para o Caso N4-S3 - JONSWAP,  $Cr = 80\%$**

### 5.5.11.3 COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS

Da análise da Fig. 5-12 à Fig. 5-15, referentes ao *método das 2 sondas*, e da Fig. 5-17 à Fig. 5-20, referentes ao *método das M sondas*, verifica-se, para as frequências de interesse, uma total coincidência do espectro incidente reconstituído ( $S_i$ ) com o espectro incidente inicial ( $S$ ). Por conseguinte, o coeficiente de reflexão obtido no final dos cálculos coincide também com o coeficiente  $Cr$  arbitrado de início, principalmente para as frequências de interesse.

Os elevados valores do coeficiente de reflexão, quer nas frequências muito baixas, quer nas muito altas, diferentes do coeficiente inicial, não têm qualquer significado visto resultarem de operações de divisão de números muito pequenos e serem, por isso, numericamente inválidos quando comparados com a ordem de grandeza de  $Cr$ .

Também os coeficientes de reflexão, calculados através da Eq. (5-82) são, nestes casos simulados, exactamente iguais aos valores arbitrados, ou seja,

$$r_o = \sqrt{\frac{m_{oR}}{m_{oI}}} = 0.4 \text{ nos casos } \mathbf{N1-S2/S3}, \mathbf{N2-S2/S3} \text{ e } \mathbf{N3-S2/S3}, \text{ e } 0.8 \text{ no casos } \mathbf{N4-S2/S3}.$$

Estes resultados comprovam, tanto para o caso do método das 2 sondas como para o caso das  $M$  sondas, a exactidão teórica dos métodos.

### 5.5.12 SIMULAÇÕES FÍSICAS

Como se viu na secção anterior, os resultados das simulações numéricas com os métodos das 2 sondas e das  $M$  sondas, permitiram verificar a exactidão teórica de ambos os métodos. A simulação física, no entanto, põe à partida problemas adicionais, relacionados com a dificuldade ou mesmo impossibilidade de controlar alguns factores, como são, nomeadamente, a dificuldade em gerar no canal exactamente o sinal construído no computador, o balanceamento da massa de água no canal, eventuais segundas reflexões na direcção de propagação e outras reflexões noutras direcções.

A aplicação dos dois métodos referidos a registos gerados em canal vai permitir verificar a sua validade nestas circunstâncias. A verificação será efectuada unicamente através do cálculo do *grau de coincidência do espectro incidente calculado com o espectro pretendido inicial*<sup>16</sup>.

---

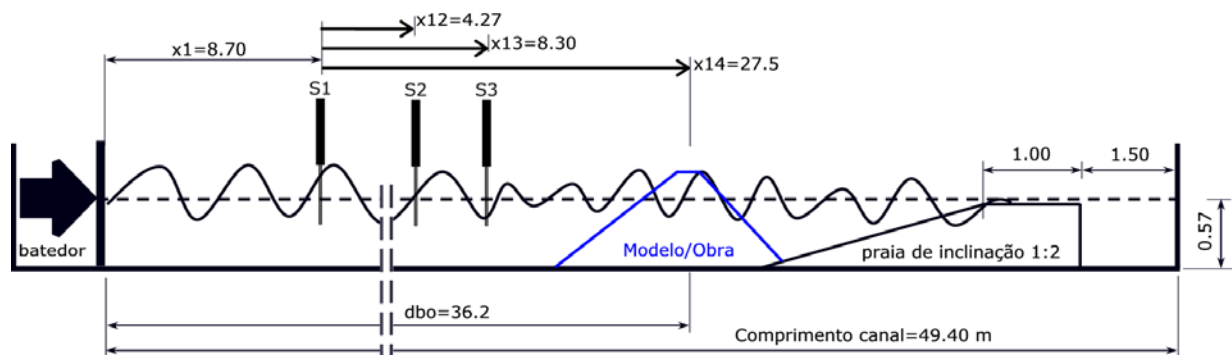
<sup>16</sup> Notar que, por vezes, os espectros incidente e reflectido calculados pelo módulo **SAM MOD 8 (Análise da Reflexão)** do pacote de *software SAM* apresentam-se bastante irregulares (ver, por exemplo, a Fig. 5-30, mais à frente). Esta instabilidade numérica pode ser "suavizada" ou "alisada" no próprio programa através de um procedimento de "médias móveis", o que permite que os espectros incidente e reflectido obtidos sejam comparáveis com o espectro pretendido. Verifica-se, no entanto, que cada caso analisado é um caso diferente, pelo que, há que ter grande cuidado com alisamentos automáticos dos sinais "brutos" obtidos. Assim, o programa permite também a opção de considerar os valores "em bruto" o que possibilita que, posteriormente, se faça o alisamento mediante a utilização de uma qualquer folha de cálculo que tenha possibilidades de importação/exportação de ficheiros, introdução de dados e visualização fáceis.



## 5.5.12.1 DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL UTILIZADA

A instalação experimental utilizada nos ensaios físicos consistiu num canal de ondas do LNEC (COI 1) com o comprimento total de 49.4 m e 1.60 m de largura, equipado com um gerador de ondas irregulares.

Na Fig. 5-21 representa-se esquematicamente, em alçado, o canal de ondas irregulares utilizado nos ensaios físicos efectuados com 2 sondas e 3 sondas, no primeiro caso sem qualquer obstáculo no canal para além da praia, e, no caso das 3 sondas, com e sem um obstáculo, designado neste trabalho por Modelo/Obra.



**Fig. 5-21 - Canal de ondas irregulares para a simulação física com 2 ou 3 sondas (dimensões em m)**

A obra, que se encontra a uma distância de 36.2 m da posição média do batedor, é um obstáculo à agitação incidente que vai evidentemente condicionar os resultados da reflexão. Este obstáculo possui um talude com a inclinação de 1:1 (*vertical:horizontal*). Também a praia existente na extremidade do canal possui uma inclinação considerável, de 1:2.

Claro que se espera que, tanto na situação sem obra (**SO**), como na situação com obra (**CO**), haja coeficientes de reflexão elevados, embora menores na primeira. Evidentemente, é nestas situações que um sistema de absorção da agitação reflectida é desejável.

Mais à frente, na Secção 5.5.13, vai efectuar-se novo estudo de separação da agitação incidente e reflectida com utilização de uma praia com a mesma inclinação (1:1) do talude do obstáculo. Porém, na Secção 5.7.1.5, a propósito da implementação de um método de geração de perfis de elevação da água, vão descrever-se ensaios considerando uma praia de amortecimento com uma inclinação bastante mais suave (1:20) e vai ver-se que se obtêm coeficientes de reflexão razoavelmente baixos (Fig. 5-34 e Fig. 5-38).

## 5.5.12.2 AQUISIÇÃO COM 2 SONDAS

Para a reconstituição dos espectros incidente e reflectido, usou-se o programa **SAM MOD 8 (Análise da Reflexão)** com os mesmos dados da simulação numérica referida em 5.5.11.1 (Quadro 5-6).

**Quadro 5-6 - Dados da Simulação Física - Método das 2 sondas**

|   |      |
|---|------|
| Duração do sinal (s) - $T_R$                              | 300  |
| Intervalo de digitalização (s) - $\Delta t$               | 0.25 |
| Número de sinusóides - $N$                                | 200  |
| Distância entre o batedor e objecto reflector (m) - $dbo$ | 36.2 |
| Distância entre o batedor e a sonda 1 (m) - $x1$          | 8.6  |
| Distância entre a sonda 1 e a sonda 2 (m) - $x12$         | 4.7  |
| Profundidade (m) - $d$                                    | 0.57 |

Os espectros fornecidos pelo módulo **SAM MOD 9-1 (Criação de Espectro Empírico)** no canal, reduzidos (de forma semelhante aos casos simulados numericamente) à escala arbitrada de  $1/50$ , foram os de JONSWAP e Pierson-Moskowitz generalizado, com os parâmetros do Quadro 5-7.

Se não houvesse reflexões e se o método de geração do sinal no batedor de ondas fosse correcto, o espectro medido seria precisamente o *espectro pretendido*, isto é, o espectro especificado para o ensaio físico que se pretende apareça transposto para a água do canal de ondas irregulares.

Na realidade, há reflexões no canal de ondas irregulares e, assim, o *espectro medido*, calculado com base nas elevações da água realmente medidas no canal, contém as componentes incidente e reflectida que interessa separar.

**Quadro 5-7 - Casos da Simulação Física - Método das 2 sondas**

|   |                                  |
|---|----------------------------------|
| Altura Significativa (m) - $H_S$        | 0.2                              |
| Período de Pico do Espectro (s) - $T_p$ | 1.7                              |
| Caso <b>F1-S2-SO</b> <sup>17</sup>      | Espectro JONSWAP, $\gamma = 3.3$ |
| Caso <b>F3-S2-SO</b>                    | Pierson-Moskowitz generalizado   |

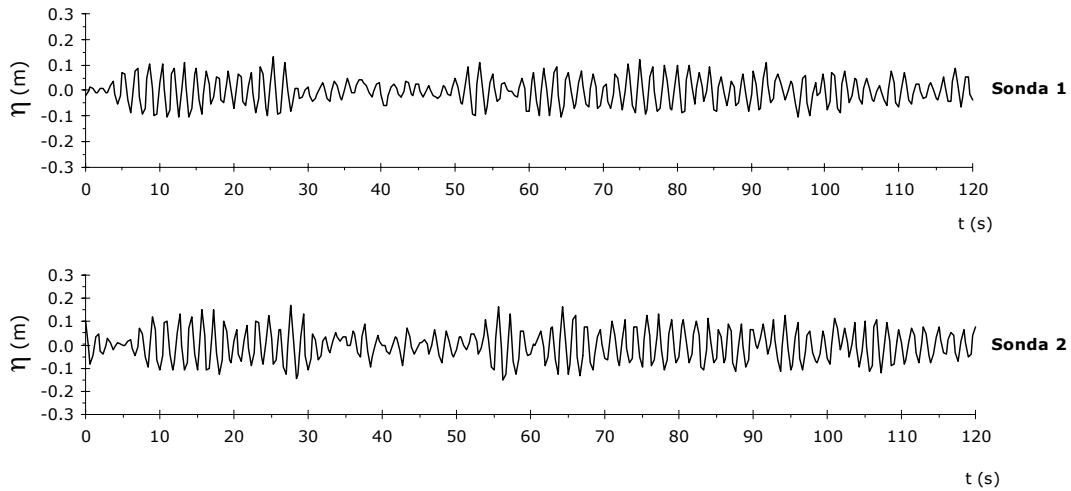
Para os dois ensaios efectuados no canal de ondas irregulares, representado esquematicamente na Fig. 5-21, são apresentados, sucessivamente, na Fig. 5-22, Fig. 5-23 e Fig. 5-24,

- um exemplo, para o caso **F1-S2-SO**, dos gráficos dos sinais (tais como foram "lidos") nas sondas (Fig. 5-22);

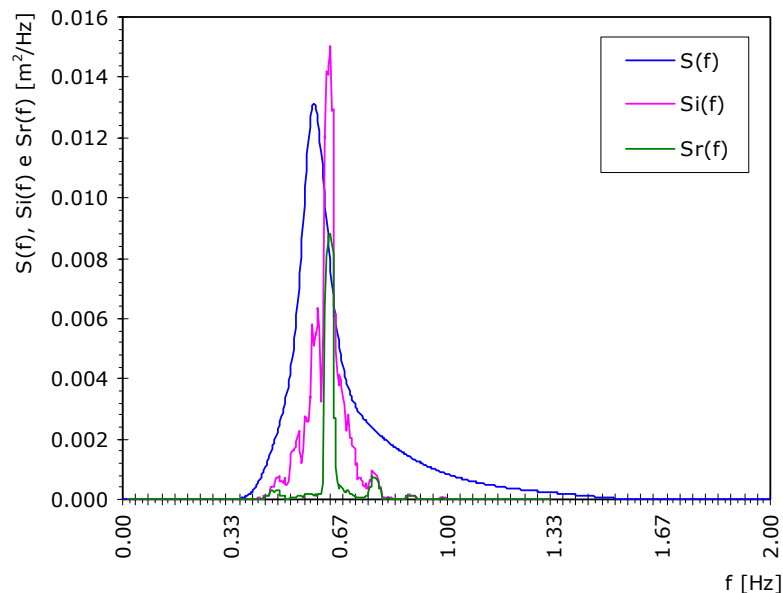
<sup>17</sup> **F1-S2-SO** significa 1ª simulação Física (**F1**) com 2 Sondas (**S2**), Sem Obra no canal (**SO**), **F2-S3-CO** significa 2ª simulação Física (**F2**) com 3 Sondas (**S3**), Com Obra no canal (**CO**), etc.

- o espectro fornecido ao gerador pelo programa de geração de ondas irregulares (espectro pretendido) e os espectros incidente e reflectido reconstituídos (alisados) por análise dos sinais das duas sondas (Fig. 5-23 e Fig. 5-24, respectivamente para os casos **F1-S2-SO** e **F3-S2-SO**).

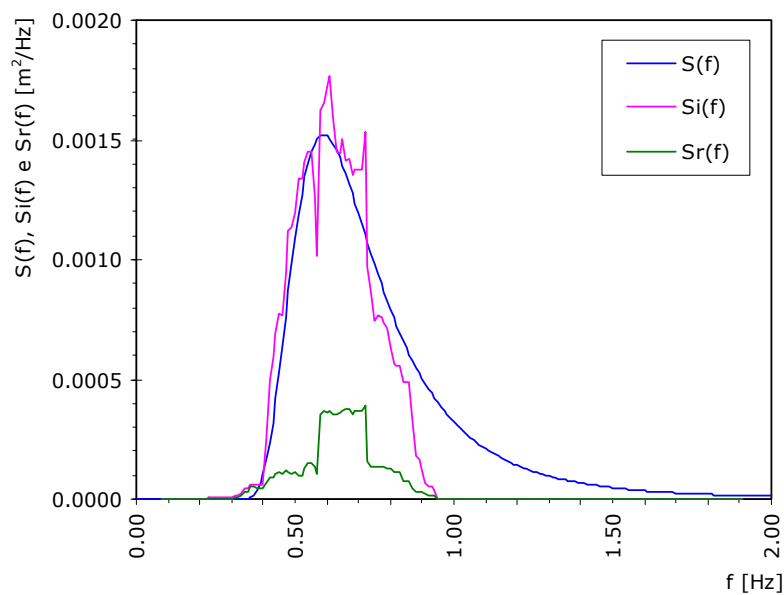
No Quadro A-5 do **Anexo 5 - Simulação Física**, apresenta-se, de modo semelhante aos casos numéricos, um extracto dos resultados da análise da reflexão contendo, para o caso **F1-S2-SO**, valores de  $S$ ,  $S_i$ ,  $S_r$ ,  $r_k$  e  $r(f)$ . Na última linha desse quadro apresenta-se  $r_0$ .



**Fig. 5-22 - Excerto dos sinais obtidos nas 2 sondas - Caso F1-S2-SO - Espectro JONSWAP**



**Fig. 5-23 - Espectro pretendido e espectros incidente e reflectido reconstituídos (alisados) - Caso F1-S2-SO - Espectro JONSWAP**



**Fig. 5-24 - Espectro pretendido e espectros incidente e reflectido reconstituídos (alisados) - Caso F3-S2-S0 - Espectro Pierson-Moskowitz generalizado**

### 5.5.12.3 AQUISIÇÃO COM 3 SONDAS

De igual forma, nesta situação com 3 sondas, foram considerados os mesmos dados dos casos de simulação numérica apresentados atrás. Para a reconstituição dos espectros incidente e reflectido quando existe um modelo (Modelo/Obra) a ensaiar no canal, usou-se como habitualmente o programa **SAM MOD 8 (Análise da Reflexão)** com os dados constantes do Quadro 5-8. Notar que a profundidade da água no canal,  $d$ , é, agora, de  $0.72\text{ m}$ .

**Quadro 5-8 - Dados da Simulação Física - Método das  $M (=3)$  sondas, Com Obra**

|   |      |
|---|------|
| Duração do sinal (s) - $T_R$                            | 180  |
| Intervalo de digitalização (s) - $\Delta t$             | 0.25 |
| Número de sinusóides - $N$                              | 360  |
| Distância entre o bater e objecto reflector (m) - $dbo$ | 36.2 |
| Distância entre o bater e a sonda 1 (m) - $x1$          | 8.70 |
| Distância entre a sonda 1 e a sonda 2 (m) - $x12$       | 4.27 |
| Distância entre a sonda 1 e a sonda 3 (m) - $x13$       | 8.30 |
| Profundidade (m) - $d$                                  | 0.72 |

Os espectros fornecidos pelo programa de geração de agitação irregular no canal, **SAM MOD 1-1 (Simulação Base Espectro)**, reduzidos (de forma semelhante aos casos numéricos) à escala arbitrada de  $1/50$ , foram os de JONSWAP, Pierson-Moskowitz (ITTC) e Pierson-Moskowitz generalizado.

**COM OBRA (CO)**

Foram analisados três casos de ensaios físicos com obra (**CO**) e utilizaram-se, como se disse, 3 sondas – Quadro 5-9.

**Quadro 5-9 - Casos de Simulação Física - Método das  $M (=3)$  sondas, CO**

|   |   |
|---|---|
| Altura Significativa ( $m$ ) - $H_S$        | 0.15                                    |
| Período de Pico do Espectro ( $s$ ) - $T_p$ | 1.7                                     |
| Caso <b>F1-S3-CO</b>                        | Espectro JONSWAP, $\gamma = 3.3$        |
| Caso <b>F2-S3-CO</b>                        | Espectro Pierson-Moskowitz (ITTC)       |
| Caso <b>F3-S3-CO</b>                        | Espectro Pierson-Moskowitz generalizado |

**SEM OBRA (SO)**

Para verificar se a praia que existe na extremidade do canal oferece condições suficientes de absorção da agitação incidente, resolveu-se fazer um ensaio físico retirando quaisquer obstáculos do canal. Obviamente que, mesmo nestas condições, são de esperar reflexões, quer da praia, quer outras não controladas (por exemplo, das paredes laterais do canal).

Neste ensaio, sem modelo no canal, isto é, sem obra (**SO**), consideraram-se 3 sondas nas posições assinaladas na Fig. 5-21 ( $S1$ ,  $S2$  e  $S3$ ), para os cálculos com o programa **SAM MOD 8 (Análise da Reflexão)**. Para a reconstituição dos espectros incidente e reflectido, usou-se também o programa **SAM MOD 8 (Análise da Reflexão)** com os dados dos Quadros 5-10 e 5-11 ( $d = 0.72 m$ ).

**Quadro 5-10 - Dados da Simulação Física - Método das  $M (=3)$  sondas, SO**

|   |       |
|---|-------|
| Duração do sinal ( $s$ ) - $T_R$                              | 180   |
| Intervalo de digitalização ( $s$ ) - $\Delta t$               | 0.25  |
| Número de sinusóides - $N$                                    | 360   |
| Distância entre o batedor e objecto reflector ( $m$ ) - $dbo$ | 36.2  |
| Distância entre o batedor e a sonda 1 ( $m$ ) - $x1$          | 8.70  |
| Distância entre a sonda 1 e a sonda 2 ( $m$ ) - $x12$         | 4.27  |
| Distância entre a sonda 1 e a sonda 3 ( $m$ ) - $x13$         | 8.30  |
| Distância entre a sonda 1 e a sonda 4 ( $m$ ) - $x14$         | 27.45 |
| Profundidade ( $m$ ) - $d$                                    | 0.72  |

**Quadro 5-11 - Casos de Simulação Física - Método das  $M (=3)$  sondas, SO**

|                                      |                                   |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Altura Significativa ( $m$ ) - $H_S$ | 0.15                              |
| Caso <b>F2-S3-SO</b>                 | Espectro Pierson-Moskowitz (ITTC) |

**MÉTODO DAS 2 SONDAS VS. MÉTODO DAS M SONDAS**

Com o objectivo de comparar os dois métodos, reanalisaram-se os casos **F2-S3-CO** e **F2-S3-SO**, considerando apenas os sinais fornecidos por duas sondas:  $S1$  e  $S2$  (Fig. 5-21); são os casos agora chamados **F2-S2-CO** e **F2-S2-SO**, respectivamente.

Deste modo, os dados para esta análise foram os que constam dos Quadros 5-12 e 5-13.

**Quadro 5-12 - Dados da Simulação Física - Método das  $M (=2)$  sondas**

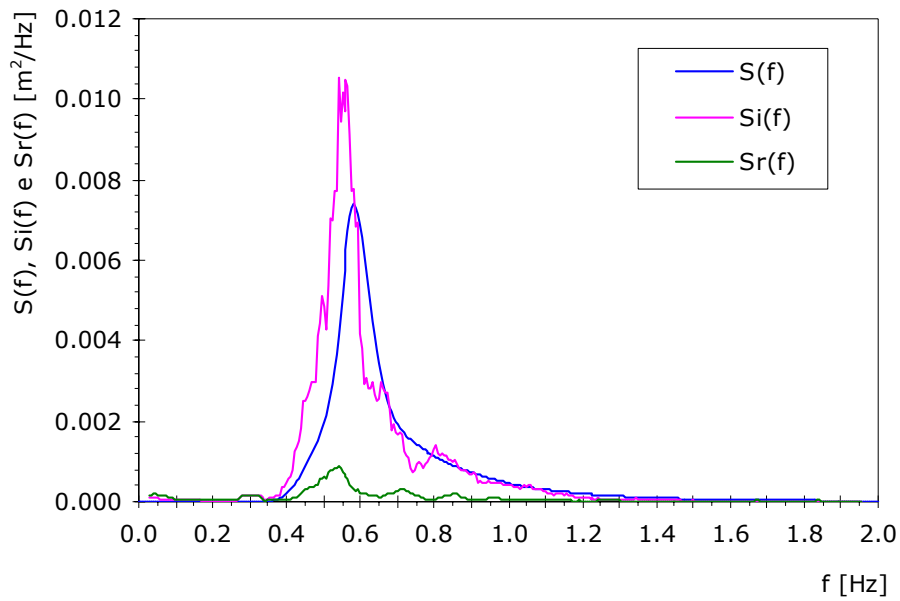
|   |      |
|---|------|
| Duração do sinal ( $s$ ) - $T$                                | 180  |
| Intervalo de digitalização ( $s$ ) - $\Delta t$               | 0.25 |
| Número de sinusóides - $N$                                    | 360  |
| Distância entre o batedor e objecto reflector ( $m$ ) - $dbo$ | 36.2 |
| Distância entre o batedor e a sonda 1 ( $m$ ) - $x1$          | 8.70 |
| Distância entre a sonda 1 e a sonda 2 ( $m$ ) - $x12$         | 4.27 |
| Profundidade ( $m$ ) - $d$                                    | 0.72 |

**Quadro 5-13 - Casos da Simulação Física - Método das  $M (=2)$  sondas**

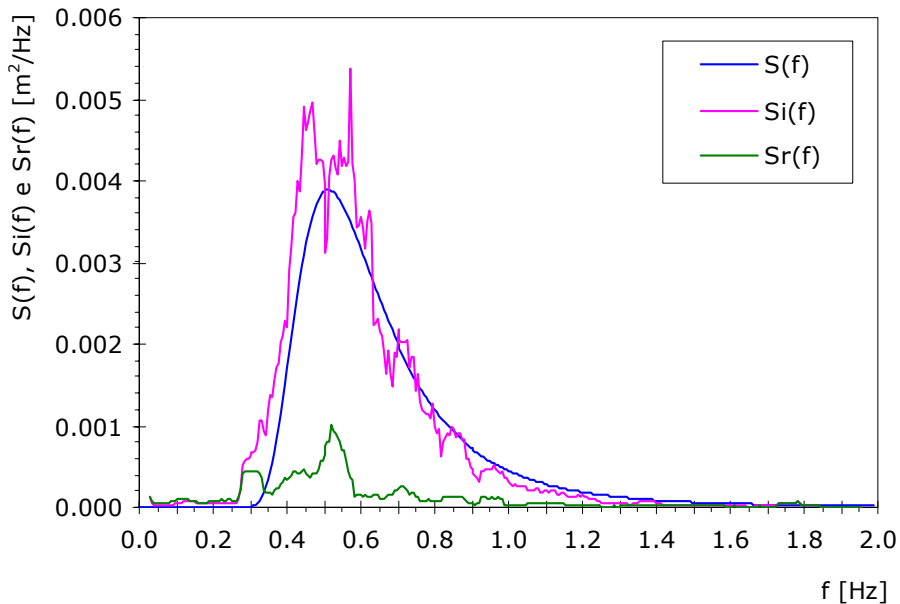
|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| Altura Significativa ( $m$ ) - $H_S$ | 0.15   |
| Caso <b>F2-S2-CO</b>                 | Espectro Pierson-Moskowitz (ITTC) - Com Obra |
| Caso <b>F2-S2-SO</b>                 | Espectro Pierson-Moskowitz (ITTC) - Sem Obra |

**RESULTADOS**

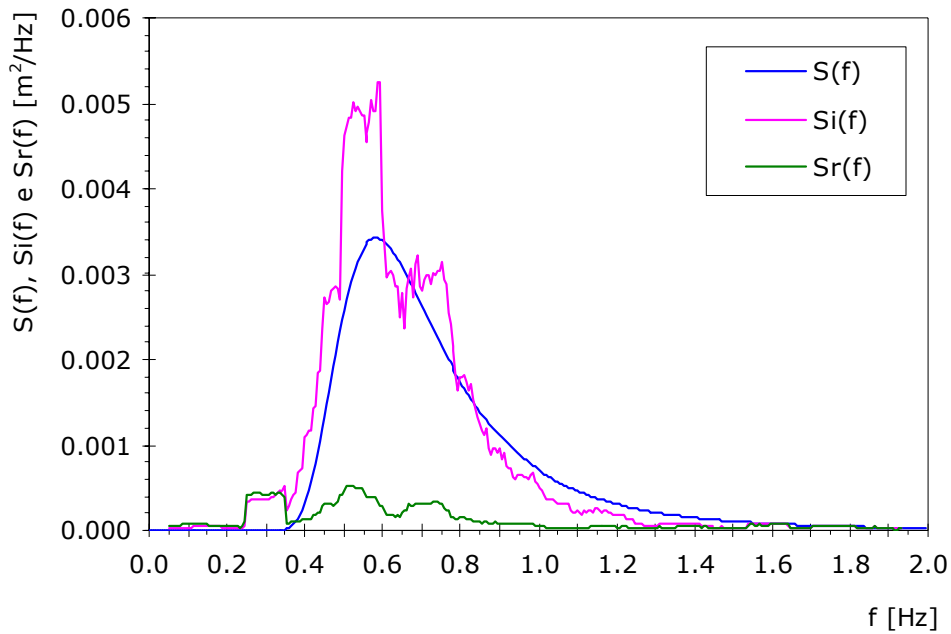
Para os seis ensaios efectuados, **F1-S3-CO**, **F2-S3-CO** e **F3-S3-CO**, **F2-S3-SO**, **F2-S2-CO** e **F2-S2-SO**, são apresentados, da Fig. 5-25 à Fig. 5-30, os espectros  $S$ ,  $S_i$  e  $S_r$ , os quais têm os significados anteriormente atribuídos.



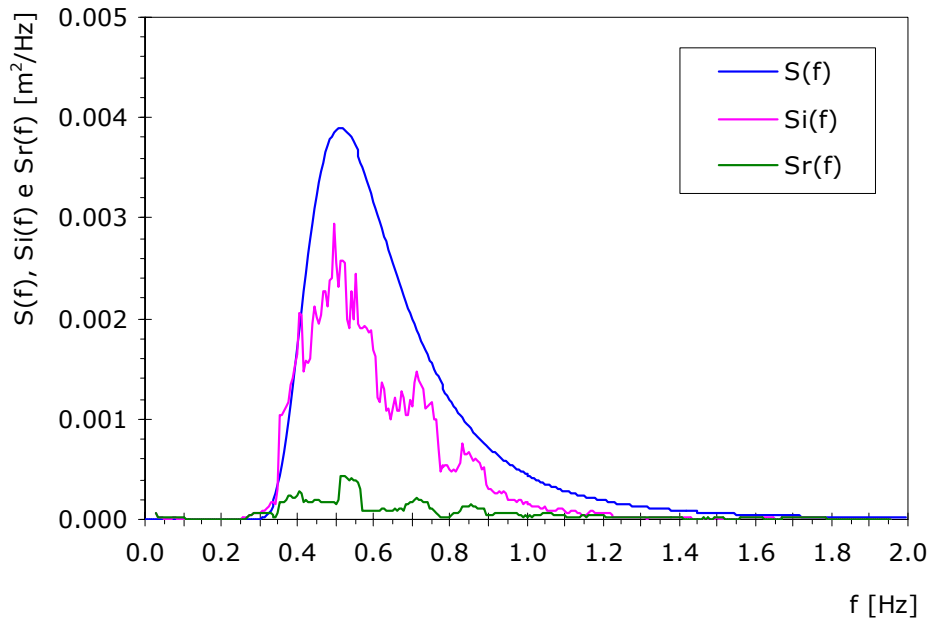
**Fig. 5-25 - Espectro pretendido e espectros incidente e refletido reconstituídos (alisados) - Caso F1-S3-CO - Espectro JONSWAP - 3 Sondas, Com Obra**



**Fig. 5-26 - Espectro pretendido e espectros incidente e refletido reconstituídos (alisados) - Caso F2-S3-CO - Espectro Pierson-Moskowitz (ITTC) - 3 Sondas, Com Obra**

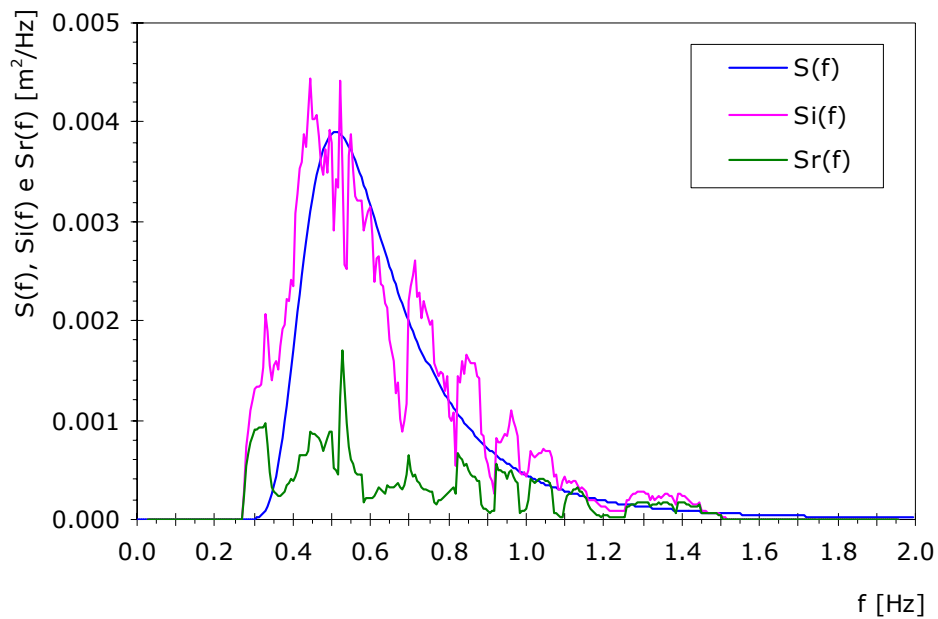


**Fig. 5-27 - Espectro pretendido e espectros incidente e refletido reconstituídos (alisados) - Caso F3-S3-CO - Espectro Pierson-Moskowitz generalizado - 3 Sondas, Com Obra**

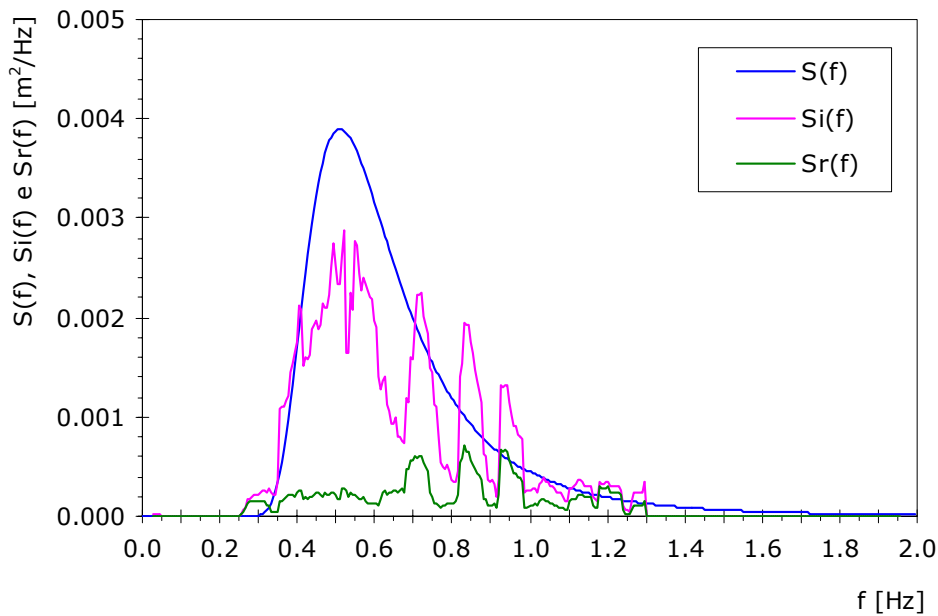


**Fig. 5-28 - Espectro pretendido e espectros incidente e refletido reconstituídos (alisados) - Caso F2-S3-SO - Espectro Pierson-Moskowitz (ITTC) - 3 Sondas, Sem Obra**





**Fig. 5-29 - Espectro pretendido e espectros incidente e refletido reconstituídos (alisados) - Caso F2-S2-CO - Espectro Pierson-Moskowitz (ITTC) - 2 Sondas, Com Obra**



**Fig. 5-30 - Espectro pretendido e espectros incidente e refletido reconstituídos (alisados) - Caso F2-S2-SO - Espectro Pierson-Moskowitz (ITTC) - 2 Sondas, Sem Obra**

Também no **Anexo 5 - Simulação Física**, no Quadro A-6, se apresenta, de modo semelhante aos casos numéricos já apresentados, um extracto dos resultados da análise da reflexão para o caso **F1-S3-CO**. Os coeficientes de reflexão, calculados através dos momentos de ordem zero dos espectros reflectido e incidente, para cada um dos casos, são os que se apresentam no Quadro 5-14.

**Quadro 5-14 - Coeficientes de reflexão das simulações físicas**

| CASO (Fig.)                 | $n$ | C/S Obra | Espectro - ( $H_s = 0.15\text{ m}$ , $T_p = 1.7\text{ s}$ ) | $r_o$ |
|-----------------------------|-----|----------|---|-------|
| <b>F1-S2-SO (Fig. 5-23)</b> | 2   | Sem      | Espectro JONSWAP  | 0.56  |
| <b>F3-S2-SO (Fig. 5-24)</b> | 2   | Sem      | Pierson-Moskowitz generalizado                              | 0.43  |
| <b>F1-S3-CO (Fig. 5-25)</b> | 3   | Com      | JONSWAP   | 0.34  |
| <b>F2-S3-CO (Fig. 5-26)</b> | 3   | Com      | Pierson-Moskowitz (ITTC)                                    | 0.39  |
| <b>F3-S3-CO (Fig. 5-27)</b> | 3   | Com      | Pierson-Moskowitz generalizado                              | 0.38  |
| <b>F2-S3-SO (Fig. 5-28)</b> | 3   | Sem      | Pierson-Moskowitz (ITTC)                                    | 0.38  |
| <b>F2-S2-CO (Fig. 5-29)</b> | 2   | Com      | Pierson-Moskowitz (ITTC)                                    | 0.53  |
| <b>F2-S2-SO (Fig. 5-30)</b> | 2   | Sem      | Pierson-Moskowitz (ITTC)                                    | 0.54  |

Dos ensaios realizados neste estudo, verifica-se que a reflexão é menor quando se utiliza um espectro mais estreito, neste caso o de JONSWAP.

No caso do método das 2 sondas, o coeficiente de reflexão  $r(f)$  apresenta valores elevados para frequências próximas da frequência de pico mas, à medida que se afasta desta, reduz-se muito rapidamente. Assim, para as condições deste canal, conclui-se que a reflexão é um fenómeno importante apenas para as frequências que contêm mais energia.

Comparando os casos **F2-S3-CO / F2-S3-SO** e **F2-S2-CO / F2-S2-SO** (espectro Pierson-Moskowitz (ITTC), com e sem obra, respectivamente), verifica-se que o coeficiente de reflexão é praticamente igual, o que quer dizer, nomeadamente, que a praia que se utilizou não cumpria totalmente a função de absorção da agitação incidente, isto é, a praia e a parede da extremidade do canal reflectiam quase tanto dessa agitação quanto o talude da obra colocada no canal. Nos casos ensaiados, isso aconteceu por, provavelmente, a altura de água no canal ser muito elevada (72 cm). Deste modo, a praia praticamente não tinha efeito e quase toda a agitação (que, neste caso, era superior, por não haver obra) era reflectida pela parede da extremidade do canal.

Verifica-se que no caso do método das  $M$  sondas há uma melhor aproximação dos espectros reconstituídos ao espectro inicial pretendido na água. Realmente, é natural que assim aconteça, visto haver uma informação mais completa (em mais pontos) do estado de agitação no canal. Assim, os valores do coeficiente de reflexão obtidos nos casos **F1-S3-CO**, **F2-S3-CO**, **F3-S3-CO** e

**F2-S3-SO**, menores (de  $r_o = 34$  a  $38\%$ ), são mais rigorosos que os obtidos quando o método utilizado utiliza apenas 2 sondas - casos **F2-S2-CO** e **F2-S2-SO** com, respectivamente,  $r_o = 53$  e  $54\%$ .

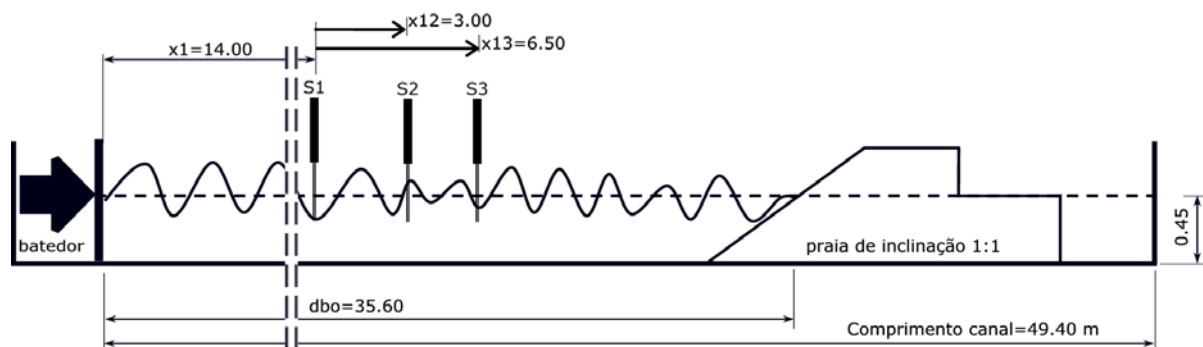
Em ambos os casos, **F1-S2-SO** e **F3-S2-SO**, da utilização do método das 2 sondas, os picos dos espectros reconstituídos surgem ligeiramente deslocados em frequência relativamente ao pico dos espectros pretendidos. Esse deslocamento, mais evidente no caso **F1-S2-SO**, poderá ser consequência de eventuais deficiências de geração que levem o espectro obtido a diferir do pretendido mais do que seria de esperar e, ainda, eventualmente, das inevitáveis limitações de precisão do equipamento de aquisição de sinais.

### 5.5.13 PROCEDIMENTOS DE APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA E FÍSICA NA DETERMINAÇÃO DA REFLEXÃO EM PRAIA DE $45^\circ$ DE INCLINAÇÃO

Nesta secção, apresenta-se parte de um conjunto de ensaios sistemáticos destinados a avaliar, em canais de ondas irregulares, a reflexão numa praia impermeável com diversas inclinações. Os ensaios foram realizados nas instalações experimentais já descritas anteriormente.

Para efectivar os ensaios propostos, foi construída uma praia reflectora, concretizada através de uma placa de madeira articulada para possibilitar diversas inclinações. Desta forma, poderia ser avaliada a influência da inclinação da praia no coeficiente de reflexão global. No entanto, por falta de tempo, só a praia inclinada a  $1:1$ , ou  $45^\circ$ , foi objecto de ensaio.

A Fig. 5-31 mostra o canal de ondas irregulares utilizado nestes ensaios, utilizando 3 sondas.



**Fig. 5-31 - Canal de ondas irregulares usado nas simulações físicas com vista à determinação da reflexão em praia de  $45^\circ$  de inclinação (dimensões em m)**

Neste estudo considerou-se, portanto, uma única inclinação da praia reflectora ( $45^\circ$ ). Não obstante, para esta inclinação, foram efectuados diversos ensaios para diferentes combinações de tipos de espectro, de períodos de pico de espectro e de alturas significativas - que correspondem a certo *ganho do gerador*.

O *ganho do batedor* é aqui entendido como sendo o curso do batedor em proporção do seu valor máximo. Pode, assim, tomar valores entre 0 e 100%, e tem influência directa na altura das ondas produzidas no canal. Assim, para um dado registo pretendido, quanto maior for o ganho introduzido (via *software*), mais elevadas são as ondas produzidas. No entanto, dependendo do tipo de registo pretendido e da profundidade da água no canal, há um limite a partir do qual não se consegue obter ondas mais elevadas, em virtude de se ter iniciado o fenómeno da rebentação nas ondas produzidas.

Se o registo pretendido no canal for viável (em virtude da limitação acima referida), pode também obter-se o *ganho óptimo do batedor* que é aquele que permite obter um registo na água cujas alturas (ou, mais simplesmente, a sua altura significativa) sejam idênticas às do registo pretendido. Na prática laboratorial, o ganho óptimo obtém-se por interpolação linear das alturas significativas determinadas após um conjunto de ensaios considerando uma série de ganhos de gerador.

#### 5.5.13.1 SIMULAÇÕES FÍSICAS NO CANAL

Para a geração dos espectros pretendidos<sup>18</sup> utilizou-se o módulo **SAM MOD 9-1 (Criação de Espectro Empírico)** do pacote de *software* **SAM - Simulação da Agitação Marítima**, descrito na Parte III. Foram considerados os espectros empíricos de JONSWAP (com  $\gamma = 3.3$ ) e Pierson-Moskowitz generalizado, com os parâmetros do Quadro 5-15.

**Quadro 5-15 - Parâmetros dos espectros utilizados**

|   |                   |
|---|-------------------|
| Altura Significativa ( $m$ ) – $H_S$        | 0.10              |
| Período de Pico do Espectro ( $s$ ) – $T_p$ | 1.13, 1.70 e 2.26 |

Numa segunda fase, foram gerados sinais com as características espectrais definidas no Quadro 5-15, modificados pela função de transferência batedor-água. Para isso, utilizaram-se o módulo **SAM MOD 1 (Simulação Numérica)** e o sub-módulo **SAM MOD 1-1 (Simulação Base Espectro)** do pacote de *software* **SAM**, com os dados do Quadro 5-16.

**Quadro 5-16 - Dados dos sinais gerados**

|   |     |
|---|-----|
| Duração do sinal, $T_R$ ( $min$ )               | 6.6 |
| Número de sinusóides, $N$ (-)                   | 199 |
| Frequência de corte do espectro, $f_c$ ( $Hz$ ) | 2.0 |
| Frequência de digitalização, $f_d$ ( $Hz$ )     | 80  |

<sup>18</sup> O *espectro pretendido* é o espectro especificado para o ensaio físico que se pretende que apareça na água, se não houvesse reflexões no canal. Se não houvesse reflexões (devidas quer à praia, quer às paredes laterais, etc.), o espectro medido seria precisamente o pretendido.

Para a geração efectiva das elevações na água e, posteriormente, para a aquisição, usou-se o módulo **SAM MOD 3 (Geração e Aquisição)**. As características do canal de ondas irregulares utilizado e as condições de ensaio foram as que constam do Quadro 5-17 (ver também a Fig. 5-31):

**Quadro 5-17 - Características do canal e condições de ensaio**

|   |       |
|---|-------|
| Número de sondas  | 3     |
| Distância entre o batedor e a praia reflectora ( <i>m</i> ) - <i>dbo</i>      | 35.60 |
| Distância entre o batedor e a <i>sonda 1</i> ( <i>m</i> ) - <i>x1</i>         | 14.00 |
| Distância entre a <i>sonda 1</i> e a <i>sonda 2</i> ( <i>m</i> ) - <i>x12</i> | 3.00  |
| Distância entre a <i>sonda 1</i> e a <i>sonda 3</i> ( <i>m</i> ) - <i>x13</i> | 6.50  |
| Profundidade ( <i>m</i> ) - <i>d</i>  | 0.45  |
| Frequência de aquisição, <i>f</i> (Hz)  | 15    |

A separação dos espectros incidente e reflectido foi efectuada pelo módulo **SAM MOD 8 (Análise da Reflexão)** do pacote **SAM** com base nos registos obtidos nas três sondas consideradas. Para esse efeito, foram considerados *2048 pontos* do registo<sup>19</sup>, ou seja, aproximadamente *2.3 min* da aquisição, isto é, a fase inicial do sinal gerado. Seguem-se os passos referidos na Secção 5.5.10.

Seguidamente, procedeu-se à comparação do espectro pretendido com os espectros incidente e reflectido. Uma outra forma de verificar se o espectro pretendido é aquele que se obtém no canal de ondas irregulares é possibilitada através do cálculo da altura significativa tendo como base o momento de ordem zero,  $m_0$ , do espectro obtido. Com efeito, uma estimativa da altura significativa do espectro incidente obtido pode ser efectuada através pela fórmula já apresentada no Capítulo 2, Eq. (2-13),

$$H_S = 4\sqrt{m_0} \quad (5-101)$$

que pode ser comparada com o valor de  $H_S$  pretendido inicialmente.

Verificou-se ainda, para um dos casos ensaiados (espectro tipo JONSWAP,  $T_p = 16$  s e 40 % de ganho, adiante designado por caso **JW16-40**<sup>20</sup>), o grau de coincidência entre os valores de altura significativa obtidos através dos espectros incidente e reflectido – Eqs. (5-84) e (5-85), e através

<sup>19</sup> Verificou-se, através de várias simulações numéricas, que, para os períodos de pico em questão, um registo com *2048 pontos* seria o adequado para uma correcta reprodução do espectro. Com efeito, tendo em consideração que a frequência de aquisição é de *15 Hz*, chegou-se a um registo com cerca de *2000 pontos* uma vez que este tamanho representaria um bom compromisso entre uma boa reprodução do espectro (quanto mais pontos, melhor é a definição do espectro) e poucas multi-reflexões (quanto menos pontos, menos reflexões tem para além da primeira). Consideraram-se, no entanto, *2048 pontos* (próximo dos *2000*) por questões práticas de resolução da transformada rápida de Fourier (FFT).

<sup>20</sup> **JW16-40** significa simulação de registo de espectro JONSWAP (**JW**), de período de pico de *16 s* (**16**) e ganho do gerador de *40%* (**40**). Nas restantes siglas, **PM** significa espectro de Pierson-Moskowitz.

do coeficiente de reflexão  $r_0$ , de acordo com o método proposto por Goda, 1985 – Eqs. (5-86) e (5-87).

Para o mesmo caso ensaiado, o período médio obtido dos espectros incidente e reflectido pode ser calculado pela Eq. (2-15),

$$\bar{T} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (5-102)$$

Os períodos assim calculados para a agitação incidente e reflectida podem ser comparados com o período médio referente ao espectro incidente pretendido.

### 5.5.13.2 ENSAIOS EFECTUADOS

Nesta secção apresentam-se os parâmetros utilizados nos ensaios realizados no canal de ondas irregulares do LNEC (canal COI 1) e os resultados obtidos, após os ensaios e depois da aplicação do módulo **SAM MOD 8 (Análise da Reflexão)**.

Foram efectuados os ensaios discriminados nos Quadros 5-18 e 5-19.

**Quadro 5-18 - Características dos ensaios: espectro JONSWAP ( $\gamma = 3.3$ )**

| <b>Ensaio</b>       | <b>Período <math>T_p</math> (s)</b> | <b>Ganho <math>G</math> (%)</b> |
|---------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Caso <b>JW8-20</b>  | 1.13                                | 20                              |
| Caso <b>JW8-30</b>  | 1.13                                | 30                              |
| Caso <b>JW8-40</b>  | 1.13                                | 40                              |
| Caso <b>JW12-20</b> | 1.70                                | 20                              |
| Caso <b>JW12-30</b> | 1.70                                | 30                              |
| Caso <b>JW12-40</b> | 1.70                                | 40                              |
| Caso <b>JW16-20</b> | 2.26                                | 20                              |
| Caso <b>JW16-30</b> | 2.26                                | 30                              |
| Caso <b>JW16-40</b> | 2.26                                | 40                              |

Para a construção destes quadros considerou-se o seguinte:

- Os períodos de pico,  $T_p$ , dos espectros utilizados nos ensaios, foram determinados considerando três valores típicos da natureza (8, 12 e 16 s) e arbitrando uma escala geométrica para a instalação experimental de 1/50. Assim, utilizando a habitual lei de semelhança de Froude (Secção 5.2), chegou-se, para esta escala arbitrada, a valores de, respectivamente, 1.13, 1.70 e 2.26 s, Eq. (5-2).

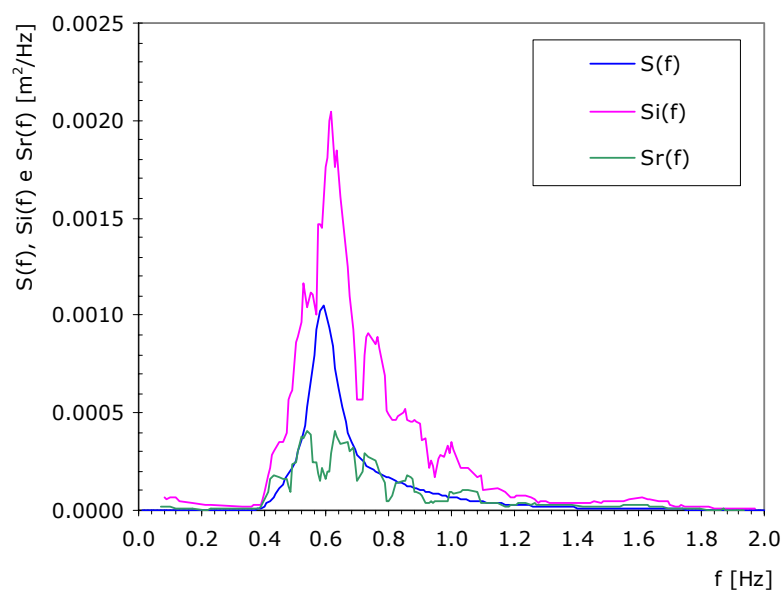
- Os ganhos,  $G$  (de 0% a 100%), referem-se ao curso máximo do batedor e determinam linearmente as alturas de onda no canal. Nos ensaios efectuados, consideraram-se ganhos a começar em 20%, com escalões de 10%, até se atingir a rebentação.

**Quadro 5-19 - Características dos ensaios: espectro Pierson-Moskowitz**

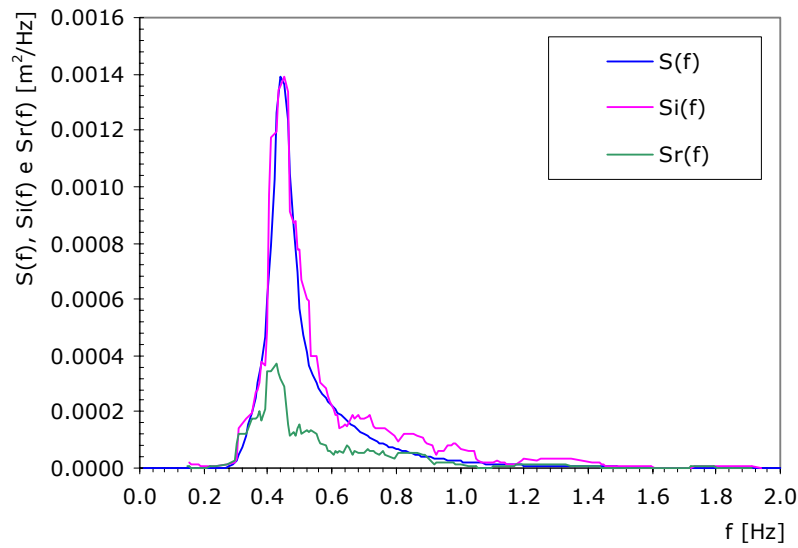
| Ensaio              | Período $T_p$ (s) | Ganho $G$ (%) |
|---------------------|-------------------|---------------|
| Caso <b>PM8-20</b>  | 1.13              | 20            |
| Caso <b>PM8-30</b>  | 1.13              | 30            |
| Caso <b>PM12-20</b> | 1.70              | 20            |
| Caso <b>PM12-30</b> | 1.70              | 30            |
| Caso <b>PM12-40</b> | 1.70              | 40            |
| Caso <b>PM16-20</b> | 2.26              | 20            |
| Caso <b>PM16-30</b> | 2.26              | 30            |
| Caso <b>PM16-40</b> | 2.26              | 40            |

### 5.5.13.3 RESULTADOS OBTIDOS

Do conjunto de ensaios efectuados, discriminados nos quadros anteriores, consideraram-se, como exemplo, dois deles para efeito de apresentação neste trabalho. Assim, nas Figs. 5-32 e 5-33, são apresentados os espectros  $S$ ,  $S_i$  e  $S_r$  para os casos **JW12-40** e **JW16-40**, respectivamente.



**Fig. 5-32 - Espectro pretendido e espectros incidente e reflectido reconstituídos (alisados). Caso JW12-40**



**Fig. 5-33 - Espectro pretendido e espectros incidente e refletido reconstituídos (alisados). Caso JW16-40**

Os coeficientes de reflexão, Eq. (5-82), para todos os casos, figuram no Quadro 5-20.

**Quadro 5-20 - Coeficientes de reflexão para os casos ensaiados**

| Ensaio              | Tipo de espectro  | Coefficiente de reflexão $r_0$ |
|---------------------|-------------------|--------------------------------|
| Caso <b>JW8-20</b>  | JONSWAP           | 0.51                           |
| Caso <b>JW8-30</b>  | JONSWAP           | 0.51                           |
| Caso <b>JW8-40</b>  | JONSWAP           | 0.49                           |
| Caso <b>PM8-20</b>  | Pierson-Moskowitz | 0.55                           |
| Caso <b>PM8-30</b>  | Pierson-Moskowitz | 0.55                           |
| Caso <b>JW12-20</b> | JONSWAP           | 0.56                           |
| Caso <b>JW12-30</b> | JONSWAP           | 0.53                           |
| Caso <b>JW12-40</b> | JONSWAP           | 0.51                           |
| Caso <b>PM12-20</b> | Pierson-Moskowitz | 0.56                           |
| Caso <b>PM12-30</b> | Pierson-Moskowitz | 0.54                           |
| Caso <b>PM12-40</b> | Pierson-Moskowitz | 0.52                           |
| Caso <b>JW16-20</b> | JONSWAP           | 0.58                           |
| Caso <b>JW16-30</b> | JONSWAP           | 0.56                           |
| Caso <b>JW16-40</b> | JONSWAP           | 0.55                           |
| Caso <b>PM16-20</b> | Pierson-Moskowitz | 0.60                           |
| Caso <b>PM16-30</b> | Pierson-Moskowitz | 0.58                           |
| Caso <b>PM16-40</b> | Pierson-Moskowitz | 0.57                           |



Para a referida inclinação de praia, obtiveram-se valores do coeficiente de reflexão nitidamente elevados. Como se esperava, a reflexão não pode, nestas condições, ser desprezada. Vai ver-se, no entanto, que para praias com inclinação bastante mais suave, os valores do coeficiente de reflexão reduzem-se substancialmente (Fig. 5-38, Secção 5.7.1.5).

Apresentam-se no Quadro 5-21, para o caso **JW16-40**, valores de altura significativa obtidos através das seguintes formas de cálculo, **(A)** a **(F)**:

- (A)** do espectro pretendido inicial, Eq. (5-101);
- (B)** do espectro incidente reconstituído, Eq. (5-84);
- (C)** do espectro reflectido reconstituído, Eq. (5-85);
- (D)** pelo cálculo directo das alturas de onda de zero ascendente do registo obtido numa das sondas;
- (E)** da Eq. (5-86), referente à componente incidente, Goda, 1985;
- (F)** da Eq. (5-87), referente à componente reflectida, Goda, 1985.

**Quadro 5-21 - Altura significativa. Caso JW16-40**

| <b>Tipo de cálculo</b> | <b><math>H_S</math> (m)</b> | <b><math>H_I</math> (m)</b> | <b><math>H_R</math> (m)</b> |
|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| momento $m_0$          | <b>(A)</b> 0.07             | <b>(B)</b> 0.06             | <b>(C)</b> 0.04             |
| Goda, 1985             | <b>(D)</b> 0.06             | <b>(E)</b> 0.05             | <b>(F)</b> 0.03             |

Igualmente, apresentam-se no Quadro 5-22 os valores do período médio de zero ascendente obtido através dos espectros incidente e reflectido pela Eq. (5-102), e o período médio de zero ascendente associado ao espectro pretendido, para o mesmo caso.

**Quadro 5-22 - Período médio. Caso JW16-40**

| <b>Tipo de cálculo</b>            | <b><math>\bar{T}</math> (s)</b> |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Espectro pretendido inicial       | 1.80                            |
| Espectro incidente reconstituído  | 1.65                            |
| Espectro reflectido reconstituído | 1.59                            |

Observa-se no Quadro 5-21 e no Quadro 5-22, que os valores de altura significativa e período médio obtidos através do sinal adquirido nas sondas e calculados através do espectro incidente pretendido, para o caso considerado, apresentam um razoável grau de coincidência. Note-se, no entanto, que esta razoável coincidência se verificou no caso em análise (Caso **JW16-40**), uma vez

que o espectro pretendido e o espectro incidente obtido eram semelhantes, isto é, conseguiu-se reproduzir aproximadamente na água o espectro pretendido.

Na realidade, as ondas no canal, depois de serem reflectidas da praia, são-no outra vez no gerador de ondas, e, assim, vão somar-se às ondas incidentes do momento, aumentando consequentemente o espectro incidente com a componente re-reflectida. Noutros casos ensaiados, em que se utilizaram períodos de pico superiores, e, consequentemente, as re-reflexões começaram a fazer-se sentir mais cedo, obteve-se, para o mesmo número de pontos considerados do registo, um espectro incidente de altura significativa bastante superior à altura significativa do espectro pretendido e, por isso, não se verificou essa coincidência.

Para avaliar as re-reflexões, poderá ser útil o cálculo de um *índice de re-reflexão*,  $i_{RR}$ , dado pela seguinte equação:

$$i_{RR} = \frac{m_{OI}}{m_{OP}} \quad (5-103)$$

sendo  $m_{OP}$  o momento de ordem zero do espectro pretendido (afectado do coeficiente de ganho,  $G$ ) e  $m_{OI}$  o momento de ordem zero do espectro incidente reconstituído.

#### 5.5.14 COMENTÁRIOS SOBRE A SEPARAÇÃO DOS ESPECTROS INCIDENTE E REFLECTIDO

Da análise dos resultados da reconstituição dos espectros incidente e reflectido obtidos com o módulo **SAM MOD 8 (Análise da Reflexão)** do pacote **SAM**, salientam-se os seguintes comentários:

- 1** Tanto no caso do método das 2 sondas como no das  $M$  sondas, após a reconstituição dos espectros incidente e reflectido, surgem, fora da zona de frequências de interesse do espectro pretendido ( $S$ ), alguns picos daqueles espectros sem qualquer significado físico. Tais picos surgem como consequência de divisões de valores ( $X_I$ ,  $X_R$ ,  $Y_I$  e  $Y_R$ ) muito pequenos. Assim, quando se analisam os resultados da reconstrução dos espectros incidente e reflectido, deve tomar-se sempre em conta, quer a zona de interesse das frequências presentes no espectro pretendido, quer a ordem de grandeza do seu pico. Apesar de as instabilidades apresentadas pelos resultados brutos dos espectros reconstituídos, fornecidos pelo programa **SAM MOD 8 (Análise da Reflexão)** com o uso do *método das  $M$  sondas*, serem em número bastante inferior às obtidas quando o método utilizado é o *das 2 sondas*, ainda se verifica ser necessário um alisamento razoável.
- 2** Verifica-se, como se esperava, aliás, que a relação entre o espectro pretendido,  $S$ , e o espectro efectivamente obtido no canal,  $S^*$ , quando há intervenção do ganho do batedor,  $G$ , é dada por:

$$S^* = G^2 S \quad (5-104)$$

- 3** Dos ensaios efectuados, verificou-se que, apenas nos referentes aos maiores períodos, as distâncias entre sondas se aproximavam das distâncias recomendadas por Goda, 1985. Ora, foi precisamente para os ensaios com os maiores períodos que se obtiveram melhores resultados (isto é, menores coeficientes de reflexão). Nesta fase inicial de ensaios, não foi possível mudar a posição das sondas por forma a que essa recomendação fosse satisfeita em todos os ensaios. Mesmo assim, recomenda-se que nos próximos ensaios a efectuar seja obedecida a recomendação de Goda, 1985, no que diz respeito à distância entre sondas. Recorde-se que, segundo aquele autor, a distância entre quaisquer duas sondas deverá situar-se aproximadamente entre 5% e 45% do comprimento de onda associado à menor e maior frequências de interesse no estudo, respectivamente.
- 4** Evidencia-se também que quanto maior o período da onda, mais rapidamente a onda reflectida alcança o batedor, sendo novamente reflectida (ou re-reflectida), e assim sucessivamente. Desta forma crescem as multi-reflexões presentes no sinal registado. Este problema poderá ser minorado posicionando-se as sondas o mais distante possível do batedor.

## **5.6 A COMPENSAÇÃO DO MOVIMENTO DO BATEDOR**

Para construir correctamente um modelo físico, é necessário reproduzir em laboratório as condições naturais. Ora, na prática, os ensaios em modelo físico são executados em zonas necessariamente limitadas, canais ou tanques, pelo que, nessas circunstâncias, não é possível simular completamente as condições naturais. Um dos problemas neste tipo de testes em laboratório reside no facto de chegarem ao batedor de ondas reflexões vindas, quer do modelo em ensaio, quer das paredes do canal ou tanque. Na natureza, este fenómeno não existe, dado que não há fronteiras fechadas nem batedor.

É evidente que uma maneira de evitar as consequências das reflexões do modelo num ensaio físico seria limitar a duração do ensaio ao período que uma onda gerada pelo batedor leva a percorrer a distância até à obra/modelo e volta ao batedor, ou seja, duas vezes a distância batedor-obra. É claro que este método não é viável pois implicaria ensaios de duração muito reduzida, não consentâneos com as necessidades dos ensaios correntes de estabilidade e galgamentos.

Outra via é desenvolver sistemas de absorção activa (*Active Wave Absorber - AWA*), sistemas combinados que, para além de permitirem gerar ondas incidentes, única função dos batedores clássicos, absorvem também as ondas reflectidas pelo modelo em ensaio. Estes sistemas prometem ser de grande utilidade. No entanto, dada a sua complexidade, o estudo e desenvolvimento deste tipo de sistemas, assim como doutros métodos de compensação do movimento do batedor, não cabem no âmbito deste trabalho.

Assim, de momento, tentou-se, no restante trabalho experimental (referente às Secções 5.7 e 5.8), reduzir as reflexões dentro do canal à custa da utilização de praias o mais absorventes possível.

## 5.7 GERAÇÃO DA ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE COM PERFIL ESPECIFICADO

Em secções anteriores, viu-se como produzir numérica e fisicamente registos cujo espectro tem características pré-especificadas. Viu-se que, uma vez que apenas se pretende que o registo tenha aquele comportamento espectral, o andamento temporal do registo não é importante. Assim, registos com o mesmo espectro, e a mesma energia, podem ser diferentes quer no que diz respeito ao seu andamento temporal, quer, eventualmente, na maneira como poderão solicitar uma dada obra marítima.

O problema de obter, num canal ou tanque bidimensional, um perfil da superfície da água (registo) com um dado espectro é bem conhecido e está bem resolvido. Uma situação menos comum surge quando se pretende obter um dado perfil temporal,  $\eta(t)$ , à distância  $x_0$  do batedor. Isto pode ser necessário por se pretender, por exemplo, reproduzir em laboratório:

- um registo de agitação natural, obtido por uma bóia-ondógrafo durante uma tempestade, de forma a conseguir estudar, de forma o mais aproximada possível, a sucessão de solicitações a que foi sujeita uma certa obra marítima;
- um registo simulado numericamente com certas características, em particular com grupos de ondas que obedeçam a certas especificações. A reprodução de grupos de ondas é especialmente importante, como já foi discutido atrás no **Capítulo 3 - Caracterização de Grupos de Ondas**.

Nesta secção trata-se, portanto, da simulação física de registos de ondas, isto é, da reprodução, na superfície da água de um canal ou tanque, de registos pré-existentes e não meramente de geração de registos com dado espectro.

Para obter, em canal, agitação cujo registo seja igual a um registo dado preexistente, abordam-se, a seguir, três métodos: o *método da integração da velocidade horizontal*, o *método da teoria dos filtros* e o *método da decomposição de Fourier*, descritos a seguir nas Secções 5.7.1, 5.7.2 e 5.7.3, respectivamente. Note-se, porém, que apenas o *método da integração da velocidade horizontal* está incorporado no pacote de *software SAM*.

### 5.7.1 MÉTODO DA INTEGRAÇÃO DA VELOCIDADE HORIZONTAL

#### 5.7.1.1 INTRODUÇÃO

O *método da integração da velocidade horizontal* foi proposto por Gravesen *et al.*, 1974, e permite a determinação de um perfil de elevações da superfície livre num ponto situado junto ao batedor de ondas, através da compatibilização da velocidade horizontal do batedor de ondas com a velocidade horizontal das partículas da água.

Este método, foi generalizado por Carvalho, 1989, possibilitando agora a obtenção de perfis de onda, quer junto ao batedor, quer num outro local do canal. Por outro lado, a sua utilização não está restringida a águas pouco profundas, como acontecia com o método original de Gravesen *et al.*, 1974.

Esta generalização do método será aplicada neste trabalho ao canal de ondas irregulares do LNEC. Porém, antes dessa aplicação, há que verificar que no canal em questão não há significativa intervenção do problema da re-reflexão, antes mencionado. Recorde-se, a propósito, que este problema existe em parte devido à inexistência de um sistema activo de absorção das ondas reflectidas pelo modelo em ensaio ou pela própria praia de amortecimento existente na extremidade do canal.

### 5.7.1.2 TEORIA

De acordo com a teoria das ondas de pequena amplitude, a duas dimensões, abordada na Secção 2.6, a componente horizontal da velocidade das partículas da água,  $u$ , num ponto de coordenadas  $(x, z)$ , é dada pela Eq. (2-40), aqui repetida,

$$u = \frac{ck \cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \eta(t) \quad (5-105)$$

Se se considerar que há apenas interesse nas ordenadas  $z$  junto à superfície, isto é, quando  $z = \eta$  e que, nestas condições,  $z \approx 0$ , quando comparada com a profundidade,  $d$ , então a componente horizontal da velocidade, junto à superfície, vem,

$$u = \frac{ck \cosh(kd)}{\sinh(kd)} \eta(t) \quad (5-106)$$

ou seja

$$u = \frac{ck}{\tanh(kd)} \eta(t) \quad (5-107)$$

sendo:

- $c$  - a velocidade de fase ou celeridade:  $c = \frac{L}{T}$ , Eq. (2-41);
- $T$  - período da onda;
- $L$  - o comprimento de onda, Eq. (2-33), ou a sua aproximação, (2-37), correspondente a  $T$ ;
- $k$  - o número de onda:  $k = 2\pi/L$ , Eq. (2-30);
- $d$  - a profundidade da água;
- $\eta(t)$  - elevação da superfície acima do NMA (nível médio da água).

Gravesen *et al.*, 1974, admitem que se está em *pequena profundidade*, o que permite supor  $kd$  pequeno e, portanto,  $\tanh(kd) \approx kd$ . Neste caso, a componente  $u$  é constante em profundidade, da superfície até ao fundo, sendo

$$u = \frac{c}{d} \eta(t) \quad (5-108)$$

Neste trabalho utiliza-se, não a simplificação acima, Eq. (5-108), mas antes a fórmula mais geral, Eq. (5-107). Esta é, assim, uma das modificações preconizadas ao método original de Gravesen *et al.*, 1974.

Seja agora  $x(t)$  a posição do batedor medida num eixo horizontal, no instante  $t$ . Admitem-se as duas hipóteses seguintes:

1. A velocidade horizontal do batedor (que se admite ser do tipo pistão, o mais usado no LNEC) é igual à componente horizontal da velocidade,  $u(t)$ , das partículas de água *na vizinhança do batedor*, isto é,

$$\frac{dx}{dt} = u(t) \quad (5-109)$$

2. É aplicável a Eq. (5-107) para a agitação gerada no canal, tal como o é para as ondas de pequena amplitude.

Se forem válidas estas hipóteses, então o movimento do batedor (ou o sinal eléctrico) necessário para produzir o perfil da superfície,  $\eta(t)$ , na vizinhança do batedor é dado por

$$x(t) = \frac{ck}{\tanh(kd)} \int_0^t \eta(s) ds \quad (5-110)$$

Assim, dado  $\eta(t)$ , pode calcular-se  $x(t)$  e, em seguida, através de um conversor digital-analógico, fazer entrar  $x(t)$  na servo-válvula de modo a produzir o perfil desejado,  $\eta(t)$ , na vizinhança do batedor.

Considere-se agora o problema de obter o perfil pretendido a certa distância,  $x_0$ , do batedor. Se o perfil se propagasse de modo rígido ao longo do canal (com alguma possível perda de energia), então o perfil à distância  $x_0$  seria o mesmo que o da vizinhança do batedor, apenas deslocado no tempo necessário para o trajecto. Neste caso, a *transformação*,  $W$ , do perfil, desde a posição de repouso do batedor até um ponto à distância  $x_0$  daquele, seria a transformação identidade.

Se, por outro lado, o perfil não se desloca de modo rígido, pode dar-se o caso de a transformação  $W$  que sofre no trajecto ser aproximadamente linear. Então, se se decompuser o sinal numa soma de sinusóides, e se se transportar cada uma delas em separado, juntando-as à distância  $x_0$ , obtém-se o sinal que de facto lá aparece. Isto pode ser usado para modificar o sinal do batedor, de modo a obter à distância  $x_0$  o sinal que se pretende.

Não sendo rígida a deslocação do sinal, nem sendo linear a sua transformação, não será possível por este processo obter o perfil à distância  $x_0$ .

Na hipótese de a transformação  $W$  ser linear, para se obter o perfil  $\eta(t)$  a uma certa distância do batedor, então tem de se calcular o perfil  $\eta_1(t)$  a gerar junto ao batedor, de modo que se produza  $\eta(t)$  à distância desejada. Em (5-110), usar-se-á então  $\eta_1(t)$  em vez de  $\eta(t)$ , ou seja, usar-se-á a Eq. (5-111):

$$x(t) = \frac{ck}{\tanh(kd)} \int_0^t \eta_1(s) ds \quad (5-111)$$

O método de cálculo de  $\eta_1(t)$  segue portanto os seguintes três passos:

1. Calculam-se, por análise harmónica, as constantes  $a_n$  e  $\varphi_n$  do perfil dado,  $\eta(t)$ :

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N a_n \cos\left(2\pi \frac{n}{T_R} t + \varphi_n\right) \quad (5-112)$$

onde  $T_R$  é a duração de  $\eta(t)$ .

Como se sabe (ver **Anexo 1 - Ferramentas Matemáticas**), se  $N$  é o número de valores de  $\eta(t)$ , isto é, se  $T_R = N \Delta t$ , então a máxima frequência que se pode considerar na fórmula anterior é

$$f_{max} = \frac{N}{T_R} = \frac{1}{2\Delta t} \quad (5-113)$$

Assim, para evitar problemas de sobreposição,  $\Delta t$  tem de ser suficientemente pequeno para que, para  $n = \frac{N}{2}$ ,  $a_n$  seja já praticamente zero.

2. Em seguida, são calculadas novas fases,  $\phi_n$ , de modo a obter  $\eta_1(t)$ . Para isto, seja,

$$\eta(x, t) = \cos(\omega t - kx) \quad (5-114)$$

uma onda progressiva sinusoidal, medida num ponto de abcissa  $x$  sobre um eixo normal ao batedor.

Num ponto de abcissa  $x+x_0$ , ter-se-á

$$\eta(x+x_0, t) = a \cos(\omega t - k(x+x_0)) = a \cos(\omega t - kx - kx_0) \quad (5-115)$$

Isto significa que a *diferença de fase* entre os dois pontos à distância  $x_0$ , para a componente sinusoidal de ordem  $n$ , é  $k_n x_0$ , ou seja,

$$\phi_n = \varphi_n + k_n x_0 \quad (5-116)$$

Por isso,  $\phi_n$  é a fase necessária em  $x = 0$  para que em  $x = x_0$  se obtenha  $\varphi_n + k_n x_0 - k_n x_0 = \varphi_n$ , que é o que se pretende.

Evidentemente que, de acordo com a Eqs. (2-30) e (2-33), respectivamente, tem-se:

$$k_n = \frac{2\pi}{L_n} \quad (5-117)$$

$$L_n = \left(\frac{T_R}{n}\right)^2 \frac{g}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L_n}\right) \quad (5-118)$$

Assim, para transformar a sinusóide de ordem  $n$  do ponto  $x+x_0$  [ponto de interesse, onde se pretende  $\eta(t)$ ] para o ponto  $x$  [vizinhança do batedor, para a qual se pretende calcular  $\eta_1(t)$ ], será necessário adicionar uma fase de  $\frac{2\pi}{L_n} x_0$ , onde  $x_0$  é a distância do batedor ao ponto de interesse. Notar que se considera  $x_0 = 0$  na posição média do batedor em repouso.

- 3.** O movimento do batedor,  $x(t)$ , necessário para produzir  $\eta(t)$ , à distância  $x_0$  da posição média de repouso do batedor, será dado pela Eq. (5-111), com as componentes de amplitude e fase do perfil  $\eta_1(t)$ :

$$\eta_1(t) = \sum_{n=1}^N a_n \cos\left(2\pi \frac{n}{T} t + \phi_n\right) = \sum_{n=1}^N a_n \cos\left(2\pi \frac{n}{T} t + \varphi_n + k_n x_0\right) \quad (5-119)$$

Para o cálculo da celeridade,  $c$ , do comprimento de onda,  $L$ , e do número de onda,  $k$ , usam-se, respectivamente, as fórmulas (2-41), (2-33) e (2-30). Notar que, para cada harmónica  $n$ , o período  $T$  das fórmulas é dado por  $T_R/n$ .

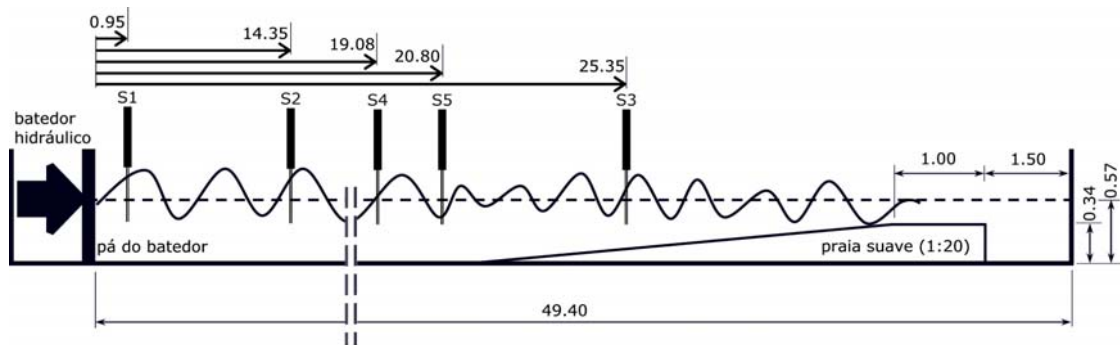
Os ensaios efectuados para este estudo tiveram em consideração duas situações distintas de aplicação do método da integração da velocidade horizontal: uma primeira (Secção 5.7.1.6 - Situação A) em que se procurou ajuizar da forma como o sinal se desloca, se de forma rígida ou não, em que não houve consideração da mudança de fases agora preconizada; e uma segunda (Secção 5.7.1.6 - Situação B) em que se consideraram mudanças de fases para estudar o seu efeito na prática.

### 5.7.1.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para testar o método em laboratório, foi utilizado o mesmo canal de ondas irregulares do LNEC (COI 1), mostrado na Fig. 5-21, mas com diferentes dispositivos de ensaio (Fig. 5-34).



Na extremidade oposta ao gerador de ondas, foi construída uma praia de betão com inclinação suave (1:20), de modo a que, o mais possível, fosse dissipada a agitação gerada e evitada a reflexão. Foram colocadas no canal 5 sondas resistivas, designadas S1 a S5, de acordo com o esquema apresentado na Fig. 5-34, onde se indicam também as respectivas distâncias à posição média de repouso do batedor. A altura de água durante os ensaios foi de 0.57 m.



**Fig. 5-34 - Esquema do canal (COI 1) usado nos ensaios (dimensões em m)**

Para os espectros utilizados nos ensaios, todos eles com períodos de pico  $T_p$  entre 1.13 s e 1.54 s, como se verá a seguir, o comprimento de onda ao largo,  $L_0$ , de acordo com a Eq. (2-36), pertencerá ao intervalo  $1.99 m \leq L_0 \leq 3.70 m$ ; a correspondente profundidade relativa ( $d/L_0$ ) do canal variará no intervalo 0.29 a 0.15. Pode, por isso, afirmar-se que os ensaios foram realizados em águas de profundidade intermédia.

Dado que, como se disse, a fórmula usada para a simulação, Eq. (5-110), tão pouco exige pequena profundidade, a profundidade de 0.57 m utilizada nos ensaios é adequada. Note-se que a fórmula proposta por Gravesen *et al.*, 1974, não seria adequada para esta profundidade.

O movimento do batedor e a aquisição de dados das sondas foram controlados através do pacote de software SAM, mais precisamente através do módulo SAM MOD 3 (Geração e Aquisição), que será descrito mais à frente, no **Capítulo 6 - Software de Simulação Numérica e Física**.

Seja  $\eta_i = \eta(i.\Delta t)$  o nível de um dos  $N$  pontos (separados de  $\Delta t$ ) do perfil dado e  $z_i = z(i.\Delta t)$  o correspondente ao registo obtido na água numa qualquer sonda. A comparação entre os perfis pretendido e o registo obtido pode ser quantificada através do cálculo do *desvio médio quadrático*,  $D_{MQ}$ :

$$D_{MQ} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_i - z_i)^2} \quad (5-120)$$

Pretendeu-se com os ensaios experimentais comparar duas situações distintas de aplicação do método da integração da velocidade horizontal.

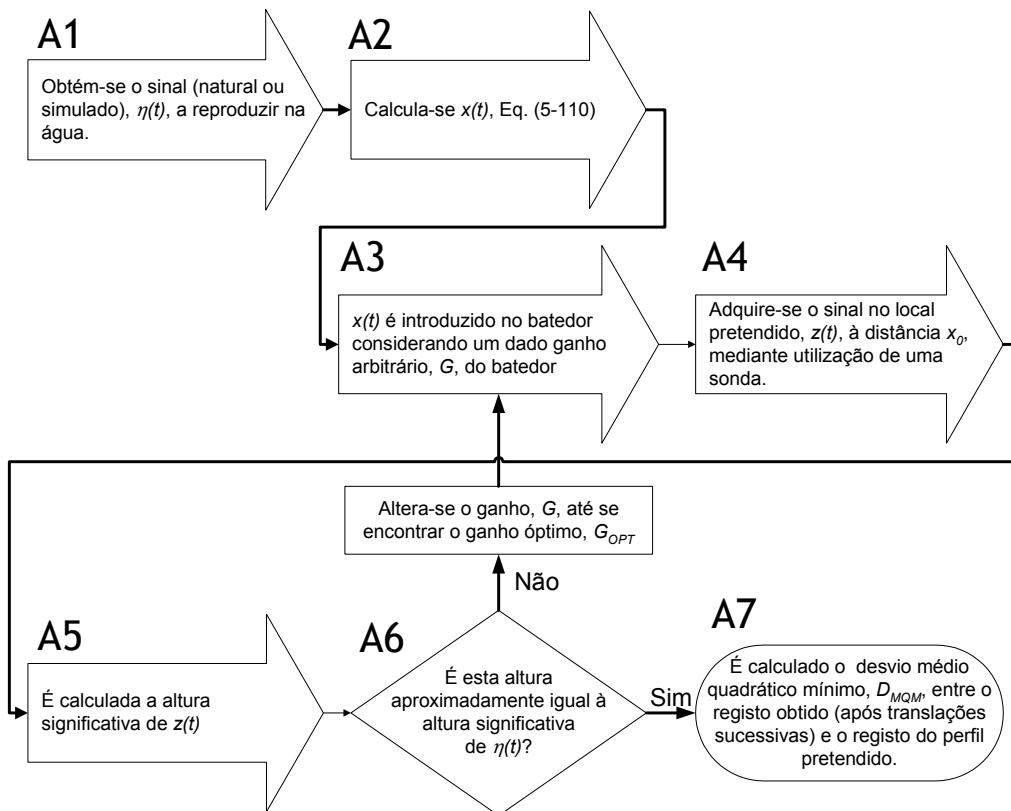
- A** A primeira situação consiste em verificar como se desloca o perfil ao longo do canal: se de modo rígido ou não. Portanto, não se considera a mudança das fases. Nesta situação, a

comparação do perfil pretendido (pré-existente) com os perfis obtidos [na água, por aplicação da Eq. (5-110)] será quantificada através do cálculo de  $D_{MQ}$  entre dois perfis após adequada translação temporal do perfil obtido na água por forma a minimizar aquele desvio. Esta translação é necessária para tomar em consideração o trajecto do perfil desde o batedor até à sonda.

- B** No caso de se verificar, como se espera, que não há rigidez, vai-se tentar resolver o problema admitindo que a transformação  $W$ , referida atrás, é linear. Esta segunda situação implica, portanto, adequada mudança de fases através da utilização das Eqs. (5-111) e (5-119). A comparação do perfil pretendido (pré-existente) com os obtidos (na água) será também quantificada através do cálculo do mínimo de  $D_{MQ}$  entre dois perfis. Evidentemente, se os perfis obtidos à distância  $x_0$  forem diferentes do pretendido, esta metodologia será infrutífera. Concluir-se-á, nesse caso, que a transformação  $W$  não é linear.

**SITUAÇÃO A**

Nesta situação (A), não havendo lugar a correcção de fases, seguem-se os seguintes passos para os ensaios físicos (Fig. 5-35):



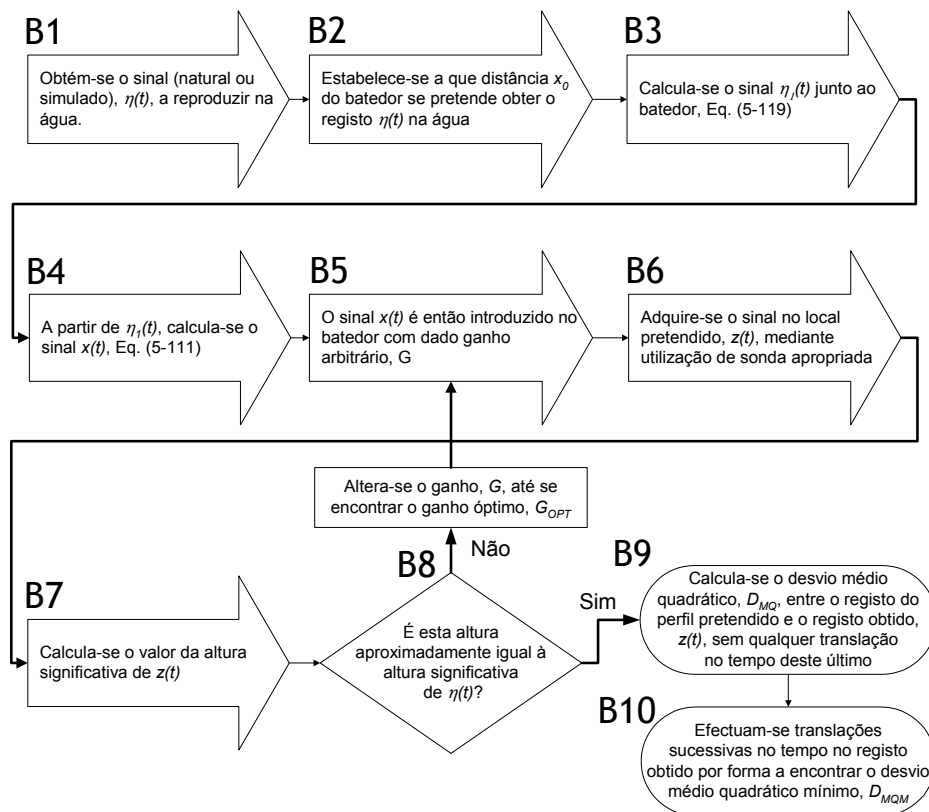
**Fig. 5-35 - Esquema de procedimentos (Situação A)**

- A1** Obtém-se o sinal  $\eta(t)$  a reproduzir na água. Este sinal pode ser natural, isto é, registo da natureza ou do canal, ou gerado em computador.

- A2** Calcula-se, pela Eq. (5-110), o sinal  $x(t)$  que deve alimentar a servo-válvula.
- A3** O sinal  $x(t)$  é então introduzido na servo-válvula, considerando inicialmente um dado ganho arbitrário,  $G$ , do batedor.
- A4** Adquire-se o sinal no local pretendido,  $z(t)$ , mediante utilização de uma sonda.
- A5** Calcula-se o valor da altura significativa de  $z(t)$ .
- A6** Se esta for, a menos de um pequeno erro, igual à altura significativa de  $\eta(t)$ , segue-se para A7; caso contrário, repetem-se os passos A3 a A5 até se encontrar, mediante interpolação, o ganho óptimo,  $G_{OPT}$ .
- A7** São efectuadas sucessivas translações no tempo do registo obtido, e calculados os respectivos  $D_{MQ}$  entre o registo do perfil pretendido e os registos obtidos, e selecciona-se o registo que, após translação, produza um desvio médio quadrático mínimo,  $D_{MQM}$ .

**SITUAÇÃO B**

Procede-se à correcção das fases, mediante os seguintes procedimentos (Fig. 5-36):



**Fig. 5-36 - Esquema de procedimentos (Situação B)**

- B1** Obtém-se o sinal  $\eta(t)$  a reproduzir na água. Este sinal pode ser natural, isto é, registo da natureza ou do canal, ou gerado em computador.

- B2** Estabelece-se a que distância  $x_0$  do batedor se pretende obter o registo  $\eta(t)$  na água.
- B3** Calcula-se, mediante análise harmónica, o sinal  $\eta_I(t)$  que deve registar-se na vizinhança do batedor por forma a obter-se o sinal  $\eta(t)$  à distância  $x_0$ . Utiliza-se, por conseguinte, as componentes harmónicas da expressão (5-119).
- B4** A partir das componentes de  $\eta_I(t)$ , calcula-se, pela Eq. (5-111), o sinal  $x(t)$ .
- B5** O sinal  $x(t)$  é então introduzido na servo-válvula, considerando inicialmente um dado ganho arbitrário,  $G$ , do batedor.
- B6** Adquire-se o sinal no local pretendido,  $z(t)$ , mediante utilização de uma sonda.
- B7** Calcula-se o valor da altura significativa de  $z(t)$ .
- B8** Se esta for, a menos de um pequeno erro, igual à altura significativa de  $\eta(t)$ , segue-se para B9; caso contrário, repetem-se os passos B5 a B7 até se encontrar, mediante interpolação, o ganho óptimo,  $G_{OPT}$ .
- B9** Calcula-se o desvio médio quadrático,  $D_{MQ}$ , entre o registo do perfil pretendido,  $\eta(t)$ , e o registo obtido,  $z(t)$ , sem qualquer translação no tempo deste último.
- B10** Efectuam-se translações sucessivas no tempo no registo obtido por forma a encontrar o desvio médio quadrático mínimo,  $D_{MQM}$ , em relação ao perfil pretendido.

#### 5.7.1.4 ESTABELECIMENTO DOS ENSAIOS

Para os ensaios físicos, consideraram-se 12 perfis simulados numericamente, correspondentes a várias condições espectrais (Quadro 5-23). Neste quadro,  $H_{ST}$  é a altura significativa pretendida e  $T_p$  é o período de pico espectral pretendido.

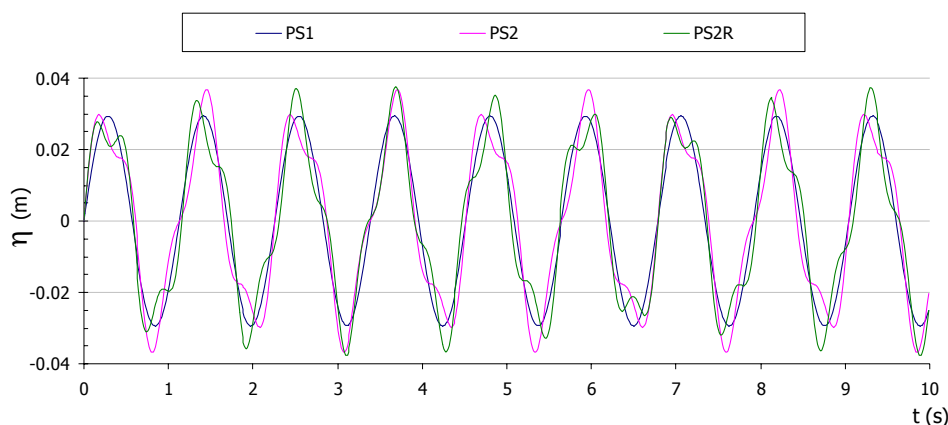
Notar que, para o efeito que se propõe neste estudo, é irrelevante a proveniência dos perfis a ensaiar. Pretende-se apenas que estes, quaisquer que sejam as suas origens, sejam reproduzidos na água.

Os doze registos, com durações de 300 segundos (escala do modelo), vão desde um registo sinusoidal (**PS1**), passando por registos com duas componentes sinusoidais (**PS2** e **PS2R**), registos com algumas componentes sinusoidais (**PS3** e **PS3A** são registos com grupos de ondas bem definidos), até um registo (**PS7**) com ondas muito irregulares. Os últimos três registos (**PS8**, **PS9** e **PS10**) foram construídos a partir doutros espectros empíricos, diferentes do espectro de JONSWAP, utilizado para os registos **PS3** a **PS7**.

Os registos **PS3** a **PS10** foram obtidos através da utilização do módulo **SAM MOD 1-1 (Simulação Base Espectro)**. Os registos **PS1**, **PS2** e **PS2R** foram construídos "manualmente" no computador, isto é, utilizando, numa folha de cálculo, a soma em cada instante das componentes dos senos de amplitude e frequência arbitradas. O registo **PS2R** apresenta características muito idênticas ao registo **PS2**. No entanto, apesar de ambos terem sido construídos com base em dois senos, estes são de diferentes frequências e amplitudes (Fig. 5-37).

**Quadro 5-23 - Características dos registos simulados (pretendidos)**

| Registo                  | Tipo de perfil   | $H_{ST}$ (m) | $T_p$ (s) |
|--------------------------|--|--------------|-----------|
| <b>PS1</b> <sup>21</sup> | 1 seno   | 0.101        | 1.13      |
| <b>PS2</b>               | 2 senos  | 0.087        | 1.13      |
| <b>PS2R</b>              | 2 senos de diferentes amplitudes e frequências         | 0.087        | 1.13      |
| <b>PS3</b>               | espectro JONSWAP muito estreito, $\gamma$ muito grande | 0.095        | 1.13      |
| <b>PS3A</b>              | espectro JONSWAP muito estreito, $\gamma$ muito grande | 0.102        | 1.13      |
| <b>PS4</b>               | espectro JONSWAP, $\gamma = 7$                         | 0.100        | 1.13      |
| <b>PS5</b>               | espectro JONSWAP, $\gamma = 3.3$                       | 0.097        | 1.12      |
| <b>PS6</b>               | espectro JONSWAP largo                                 | 0.100        | 1.16      |
| <b>PS7</b>               | espectro JONSWAP muito largo                           | 0.095        | 1.25      |
| <b>PS8</b>               | espectro Pierson-Moskowitz ITTC                        | 0.090        | 1.54      |
| <b>PS9</b>               | espectro Pierson-Moskowitz Generalizado                | 0.097        | 1.14      |
| <b>PS10</b>              | espectro Bretschneider-Mitsuyasu                       | 0.101        | 1.21      |

**Fig. 5-37 - Pormenor dos perfis PS1, PS2 e PS2R**

De igual modo, o registo **PS3A** apresenta características muito idênticas ao registo **PS3** (espectro JONSWAP muito estreito e  $\gamma$  muito grande), apenas diferentes por serem duas realizações obtidas da aplicação do MFA, Carvalho, 1989, incluído no módulo **SAM MOD 1-1 (Simulação Base Espectro)** - ver também a Eq. (4-2), pág. 86, deste trabalho.

Todos os ensaios foram realizados no canal de ondas irregulares, de acordo com o esquema da Fig. 5-34. Como foi referido anteriormente, para cada perfil, foi necessário calcular o chamado ganho

<sup>21</sup> **PS1** é o Perfil Simulado  $n^{\circ}$  1, **PS2** é Perfil Simulado  $n^{\circ}$  2, etc.

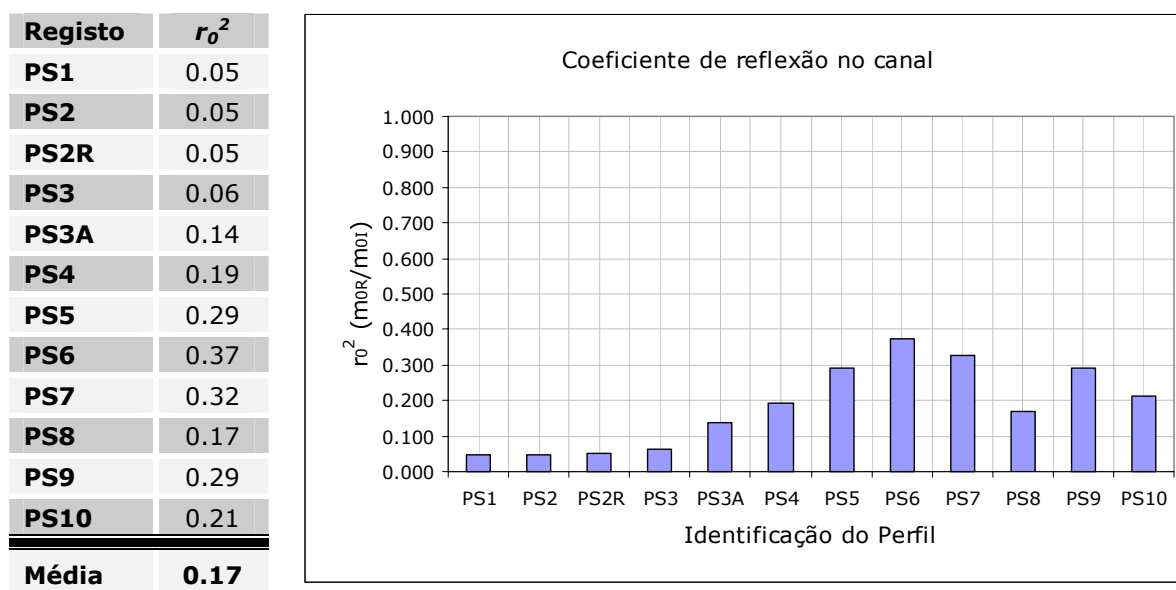
óptimo do batedor,  $G_{OPT}$ , isto é, aquele que permitia obter na água um registo cuja altura significativa tinha o mesmo valor da altura significativa do perfil pretendido. Assim tornou-se necessário considerar diferentes ganhos do gerador (a que correspondiam diferentes alturas significativas). O ganho óptimo foi calculado através de interpolação linear do conjunto de alturas significativas obtido. Para os diferentes perfis, foram considerados ganhos de 5, 10, 20, 30, 40, 50%, conforme o registo considerado. De notar que o valor máximo de ganho considerado nos ensaios de cada perfil era atingido quando começava a ocorrer rebentação das ondas produzidas no canal.

### 5.7.1.5 ANÁLISE DE REFLEXÃO

Para que o método proposto tenha êxito, é necessário assegurar que a reflexão da agitação seja a mínima possível, pelo que deve existir uma praia o mais absorvente possível na extremidade do canal (ver estudo apresentado na Secção 5.5.13), sendo a reflexão estudada pelos métodos expostos na Secção 5.5.

Depois de assegurada a correcção do método podem, em princípio, fazer-se ensaios com obras reflectoras. No entanto, há uma diferença relativamente à natureza que convém recordar. Embora na natureza se verifique também a reflexão, o certo é que na natureza não existe um batedor que reflecta a agitação reflectida. Por isso, só quando estiver operacional um método que permita ao batedor compensar a agitação reflectida pelas obras é que os ensaios de obras marítimas em canal se poderão considerar correctos.

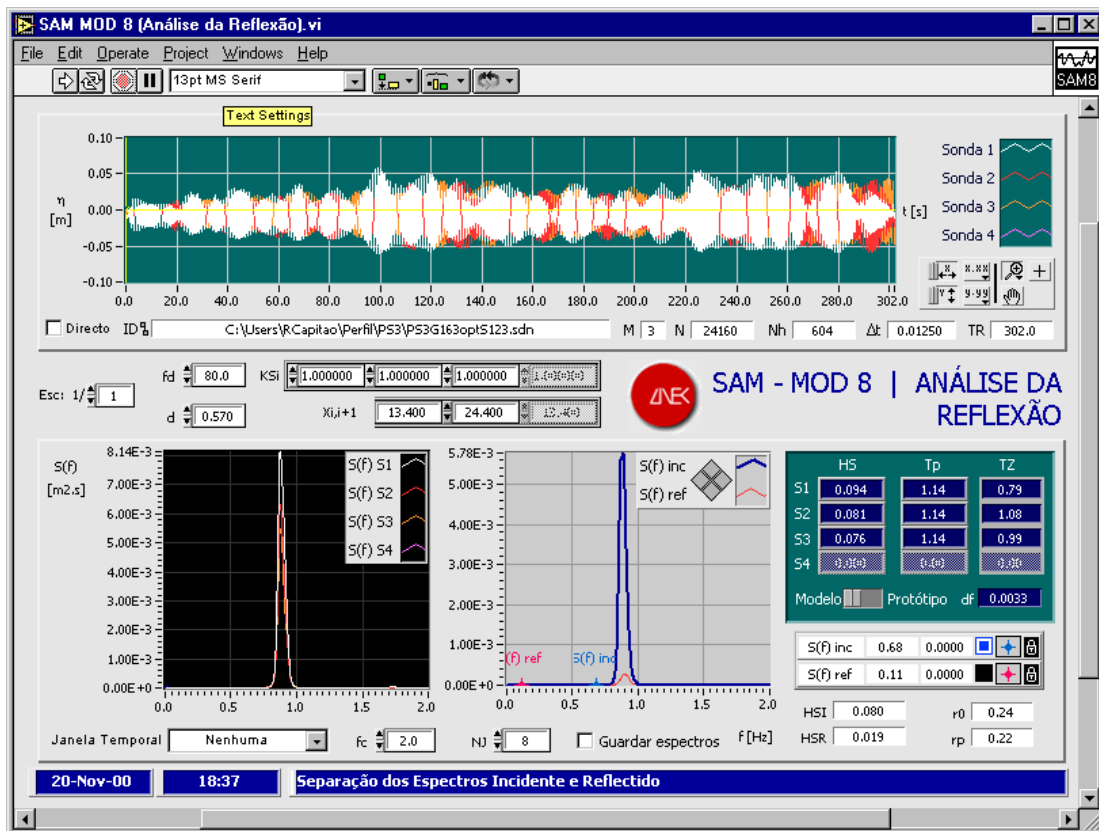
Os cálculos de reflexão efectuados com o módulo **SAM MOD 8 (Análise da Reflexão)** mostram coeficientes de reflexão,  $r_0^2$ , obtidos da Eq. (5-82), que vão de 5% (**PS1**) até 37% (**PS6**), para a “praia suave” de inclinação 1:20 representada na Fig. 5-34. A Fig. 5-38 mostra os coeficientes de reflexão,  $r_0^2$ , calculados pelo módulo indicado, e a sua média, considerados todos os ensaios.



**Fig. 5-38 - Coeficientes de reflexão obtidos a partir das sondas S2, S4 e S5**

Estes valores podem ser considerados razoavelmente baixos para um canal provido apenas de uma praia de absorção. Efectuou-se, de acordo com o método das  $M$  sondas (Secção 5.5.2.2), uma análise de reflexão para todos os perfis, usando as sondas S2, S4 e S5 (Fig. 5-34), dado que as sondas S1, S2 e S3, que seriam usadas para a verificação do método de reprodução de perfis na água descrito nesta secção, estavam demasiado afastadas umas das outras.

Como exemplo, a Fig. 5-39 mostra (em baixo, à direita) os espectros incidente (a azul) e reflectido (a encarnado) correspondentes aos cálculos de reflexão para o perfil **PS3** utilizando o módulo **SAM MOD 8 (Análise da Reflexão)** e as sondas S1, S2 e S3.



**Fig. 5-39 - Painel da separação da agitação incidente e reflectida para o perfil PS3**

Verifica-se, neste caso (**PS3**), que o espectro reflectido é muito pequeno comparado com o espectro incidente. Noutros casos, porém, embora a diferença se mantenha em quase todas as frequências de interesse, podem encontrar-se, para as frequências próximas da do pico, valores significativos do espectro reflectido.

### 5.7.1.6 RESULTADOS

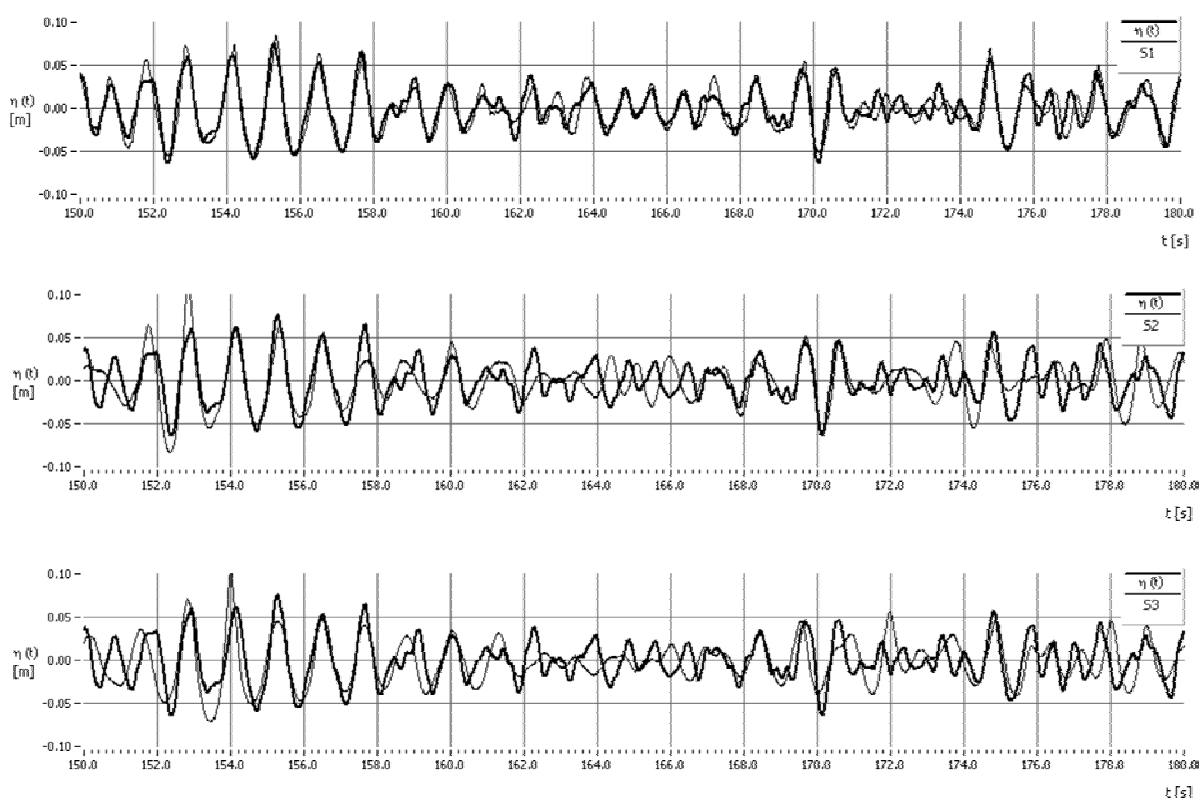
#### SITUAÇÃO A

A verificação do método é efectuada através da comparação entre o perfil dado (e pretendido na água) e o perfil obtido em cada ensaio.

Como se disse anteriormente, nesta situação de aplicação do método (passos A1 a A7), não se considera nenhuma correcção de fases no registo da sonda devida à sua posição afastada do bate-dor.

Deste modo, para efeitos de comparação do perfil pretendido (pré-existente) e obtido (na água), efectua-se adequada translação temporal (deslize no tempo, para conseguir a melhor coincidência possível) do perfil obtido na água por forma a minimizar o desvio médio quadrático entre os dois.

Na Fig. 5-40, pode observar-se um trecho da comparação entre o perfil pretendido (**PS5**) e os perfis obtidos na água, para as três sondas mencionadas. Este trecho corresponde a uma duração de 30 s, entre os instantes  $t = 150$  s e  $t = 180$  s, sendo  $t = 0$  s o início do registo.



**Fig. 5-40 - Comparação PS5 - (150-180 s) - Situação A, para as Sondas S1, S2 e S3**

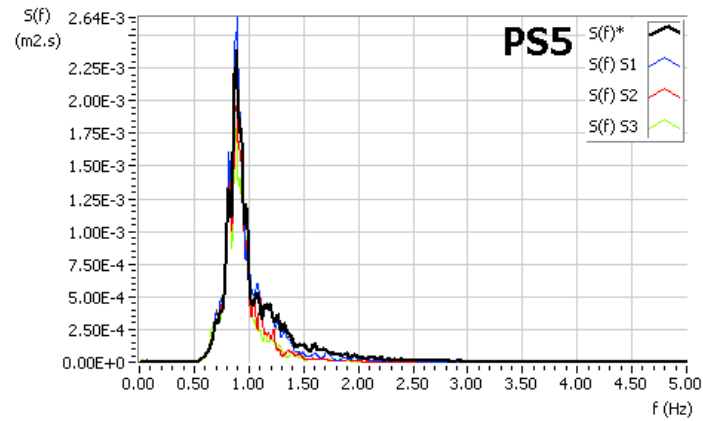
Como se pode ver, os desvios entre os registos pretendido e obtido na sonda S1 são muito pequenos, embora, para as outras duas sondas, se observem maiores desvios.

Estes desvios podem dever-se, não só à reflexão, mas também ao facto de o perfil não se deslocar rigidamente, como se considerou acima. Adiante se descreverão as tentativas feitas para obviar a esta dificuldade. Mais para o fim do registo, notam-se desvios ligeiramente maiores.

Note-se que para obter em S2 e S3 ondas de amplitudes idênticas às obtidas em S1, houve que impor ganhos do bate-dor superiores, visto que há maiores perdas de energia no trajecto desde o bate-dor até a S2 e S3 (mais para este último) do que até S1.

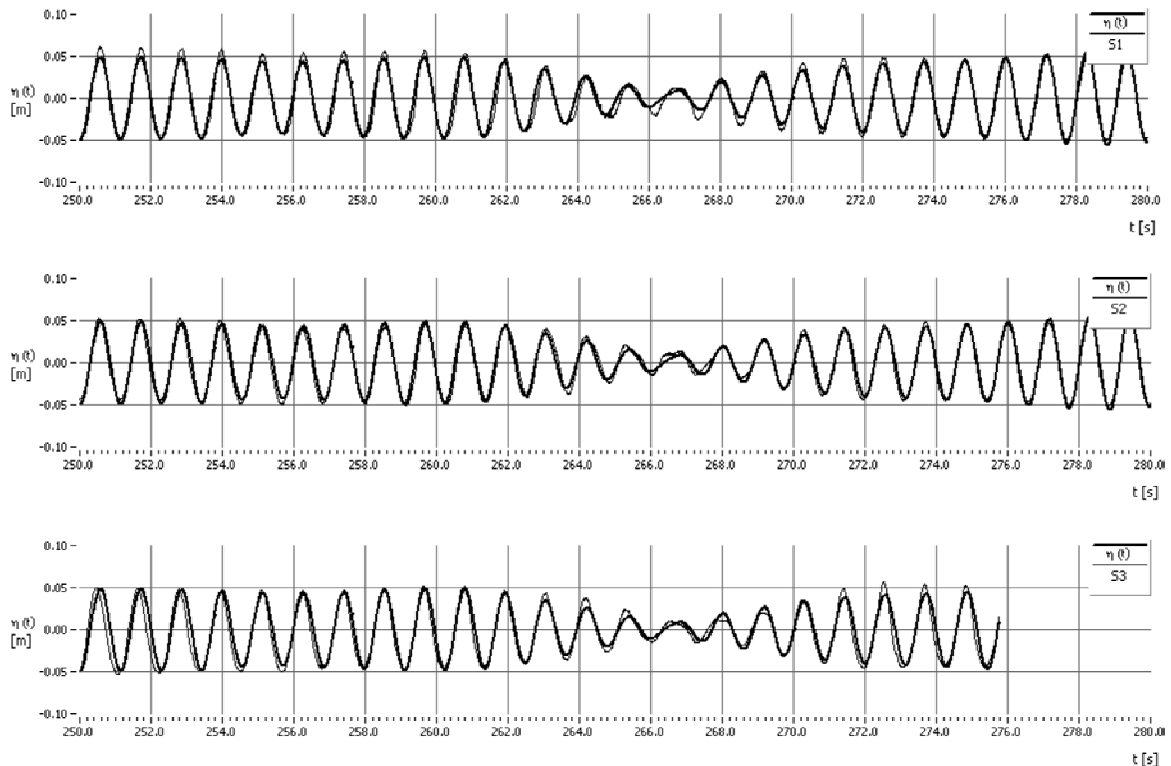


Este exemplo considera um perfil relativamente irregular, como, aliás, se pode confirmar observando a Fig. 5-41, que mostra os relativamente largos espectros dos registos pretendido e obtidos nas três sondas.

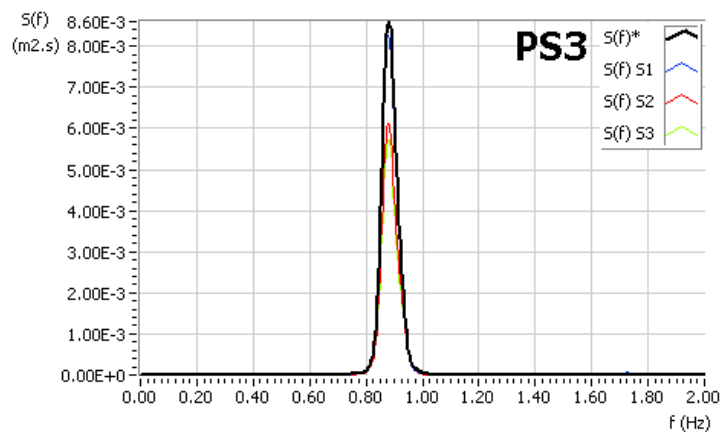


**Fig. 5-41 - Espectros do perfil (PS5) pretendido (—) e dos perfis obtidos nas sondas S1 (—), S2 (—) e S3 (—)**

Na Fig. 5-42, fazem-se comparações semelhantes às da Fig. 5-40, agora para um perfil pretendido mais regular (**PS3**), que apresenta grupos de ondas bem definidos (ver espectros na Fig. 5-43).

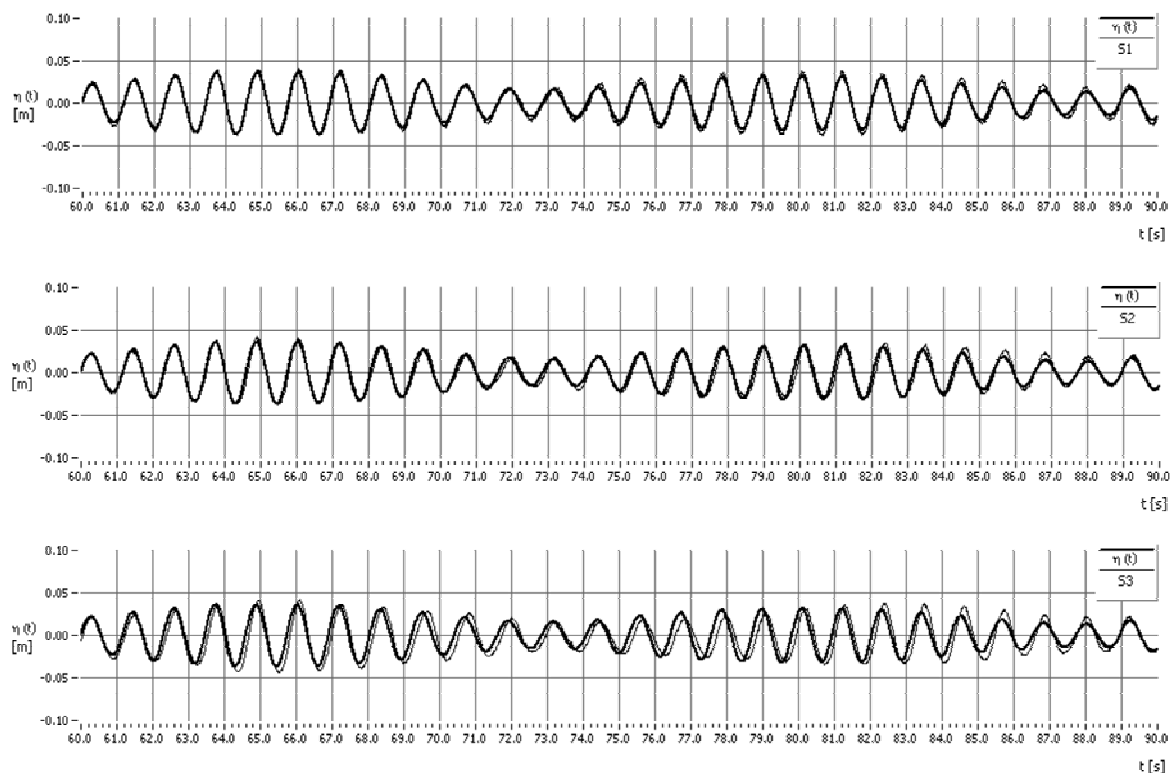


**Fig. 5-42 - Comparação PS3 – (250-280 s) - Situação A, para as Sondas S1, S2 e S3**



**Fig. 5-43 - Espectros do perfil (PS3) pretendido (—) e dos perfis obtidos nas sondas S1 (—), S2 (—) e S3 (—)**

A Fig. 5-42 mostra parte da comparação feita, correspondendo a um trecho do perfil próximo do fim, entre os instantes  $t = 250$  s e  $t = 280$  s. Apesar disso, a concordância entre perfis pretendido e obtidos é excelente, tanto para a sonda S1 como para as outras duas sondas. A concordância no início dos perfis é igualmente excelente para todas as sondas, como mostra a Fig. 5-44, embora melhor para S1 e S2.



**Fig. 5-44 - Comparação PS3 – (60-90 s) - Situação A, para as Sondas S1, S2 e S3**

O Quadro 5-24 mostra os resultados das comparações entre perfis para todas as sondas.

**Quadro 5-24 - Comparações entre perfis pretendido e obtido – Situação A**

| Perfil                           | Descrição  | $H_{ST}$ (m) | $T_p$ (s)   | Situação A (COM deslize temporal, SEM mudança de fases) |             |             |              |              |              |               |               |               |
|----------------------------------|--|--------------|-------------|---|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
|                                  |  |              |             | $G_{OPT}$ (%)   |             |             | $H_{SO}$ (m) |              |              | $D_{MQ}$ (m)  |               |               |
|                                  |  |              |             | S1  | S2          | S3          | S1           | S2           | S3           | S1            | S2            | S3            |
| <b>PS1</b>                       | 1 seno   | 0.101        | 1.13        | 9.9   | 11.7        | 13.4        | 0.105        | 0.103        | 0.102        | 0.0045        | 0.0029        | 0.0039        |
| <b>PS2</b>                       | 2 senos  | 0.087        | 1.13        | 9.1   | 11.2        | 12.7        | 0.091        | 0.089        | 0.088        | 0.0067        | 0.0062        | 0.0072        |
| <b>PS2R</b>                      | 2 senos  | 0.087        | 1.13        | 9.4   | 10.8        | 12.1        | 0.090        | 0.088        | 0.089        | 0.0066        | 0.0065        | 0.0069        |
| <b>PS3</b>                       | Com espectro JONSWAP muito estreito, $\gamma$ muito grande | 0.095        | 1.14        | 17.2  | 19.6        | 22.9        | 0.098        | 0.096        | 0.098        | 0.0055        | 0.0052        | 0.0106        |
| <b>PS3A</b>                      | Com espectro JONSWAP muito estreito, $\gamma$ muito grande | 0.110        | 1.13        | 22.6  | 25.8        | 30.0        | 0.113        | 0.111        | 0.110        | 0.0073        | 0.0095        | 0.0214        |
| <b>PS4</b>                       | Com espectro JONSWAP, $\gamma=7$                           | 0.100        | 1.13        | 28.4  | 33.8        | 38.3        | 0.100        | 0.100        | 0.099        | 0.0103        | 0.0197        | 0.0230        |
| <b>PS5</b>                       | Com espectro JONSWAP, $\gamma=3.3$                         | 0.097        | 1.12        | 29.4  | 35.0        | 41.1        | 0.099        | 0.098        | 0.096        | 0.0115        | 0.0225        | 0.0252        |
| <b>PS6</b>                       | Com espectro JONSWAP largo                                 | 0.100        | 1.16        | 26.2  | 34.6        | 40.2        | 0.101        | 0.102        | 0.101        | 0.0135        | 0.0257        | 0.0279        |
| <b>PS7</b>                       | Com espectro JONSWAP muito largo                           | 0.095        | 1.25        | 24.6  | 33.7        | 40.0        | 0.095        | 0.096        | 0.095        | 0.0135        | 0.0267        | 0.0281        |
| <b>PS8</b>                       | Com espectro Pierson-Moskowitz ITTC                        | 0.090        | 1.54        | 27.0  | 32.5        | 34.3        | 0.090        | 0.091        | 0.087        | 0.0107        | 0.0222        | 0.0242        |
| <b>PS9</b>                       | Com espectro Pierson-Moskowitz Generalizado                | 0.097        | 1.14        | 22.7  | 29.2        | 35.0        | 0.097        | 0.098        | 0.099        | 0.0130        | 0.0256        | 0.0279        |
| <b>PS10</b>                      | Com espectro Bretschneider-Mitsuyasu                       | 0.101        | 1.21        | 23.1  | 29.7        | 35.0        | 0.101        | 0.102        | 0.102        | 0.0130        | 0.0257        | 0.0282        |
| <b>Médias</b>                    |  | <b>0.097</b> | <b>1.18</b> | <b>20.8</b>   | <b>25.6</b> | <b>29.6</b> | <b>0.098</b> | <b>0.098</b> | <b>0.097</b> | <b>0.0097</b> | <b>0.0165</b> | <b>0.0195</b> |
| <b>Desvio em relação à média</b> |  |              |             |   |             |             | <b>2%</b>    | <b>1%</b>    | <b>1%</b>    | <b>10%</b>    | <b>17%</b>    | <b>20%</b>    |

Neste quadro, é

$H_{ST}$  - a altura significativa pretendida, para cada perfil;

$G_{OPT}$  - o ganho óptimo do batedor;

$H_{SO}$  - a altura significativa obtida, para cada perfil;

$D_{MQ}$  - o desvio médio quadrático entre os perfis pretendido e obtido, para  $G_{OPT}$  obtido nas três sondas.

O valor médio dos desvios médios quadráticos na sonda S1 é de  $0.0098m$ , cerca de  $10\%$  da altura significativa média,  $0.097$ , o que se pode considerar uma boa concordância geral, ao passo que para as sondas S2 e S3 são, respectivamente, de  $0.0165 m$  e  $0.0195 m$ , não tão bons como os da sonda S1, mas ainda assim razoáveis. Notar que os perfis **PS1**, **PS2**, **PS2R**, **PS3**, **PS3A** e **PS4**, por serem menos irregulares, apresentam os desvios mais reduzidos.

Dos resultados obtidos para a situação A, conclui-se que a deslocação do perfil ao longo do canal é aproximadamente rígida, pelo menos para as ondas monocromáticas ou sinais com espectro estreito (como parecem ser os casos analisados). Uma possível explicação para estes resultados residirá no facto de ser pequena a distância disponível no canal de ensaio, entre o batedor e a praia. Apesar disto, resolveu-se tentar melhorar os resultados experimentando através da modificação das fases (situação B).

**SITUAÇÃO B**

A correcção das fases é efectuada através da utilização da Eq. (5-111), onde se usa  $\eta_1(t)$  em vez de  $\eta(t)$  - passos B1 a B10. Esta correcção é considerada no módulo LabVIEW correspondente, **SAM MOD 1-3 (Perfil Dado)**, que será descrito em 6.5.3.3. A verificação do método nesta situação é também efectuada através de comparação entre o perfil dado (e pretendido na água) e o perfil obtido em cada ensaio. Foram consideradas as mesmas três sondas (S1, S2 e S3) esquematizadas na Fig. 5-34.

Para ter uma ideia da translação temporal que, em princípio, é necessário considerar para a comparação dos registos nesta situação, repare-se que o tempo,  $t_s$ , necessário para que uma onda de período  $T$  percorra a distância,  $s$ , que vai desde a posição do batedor em repouso até a um dado ponto no canal, pode ser obtida através da seguinte fórmula da teoria linear da onda (Secção 2.6):

$$t_s = \frac{s}{c} = \frac{s}{\sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)}} = \frac{s}{\sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{L}d\right)}} \quad (5-121)$$

sendo

$c$  - a celeridade da onda, obtida a partir da Eq. (2-31);

$L$  - o comprimento de onda, dado pela Eq. (2-37).

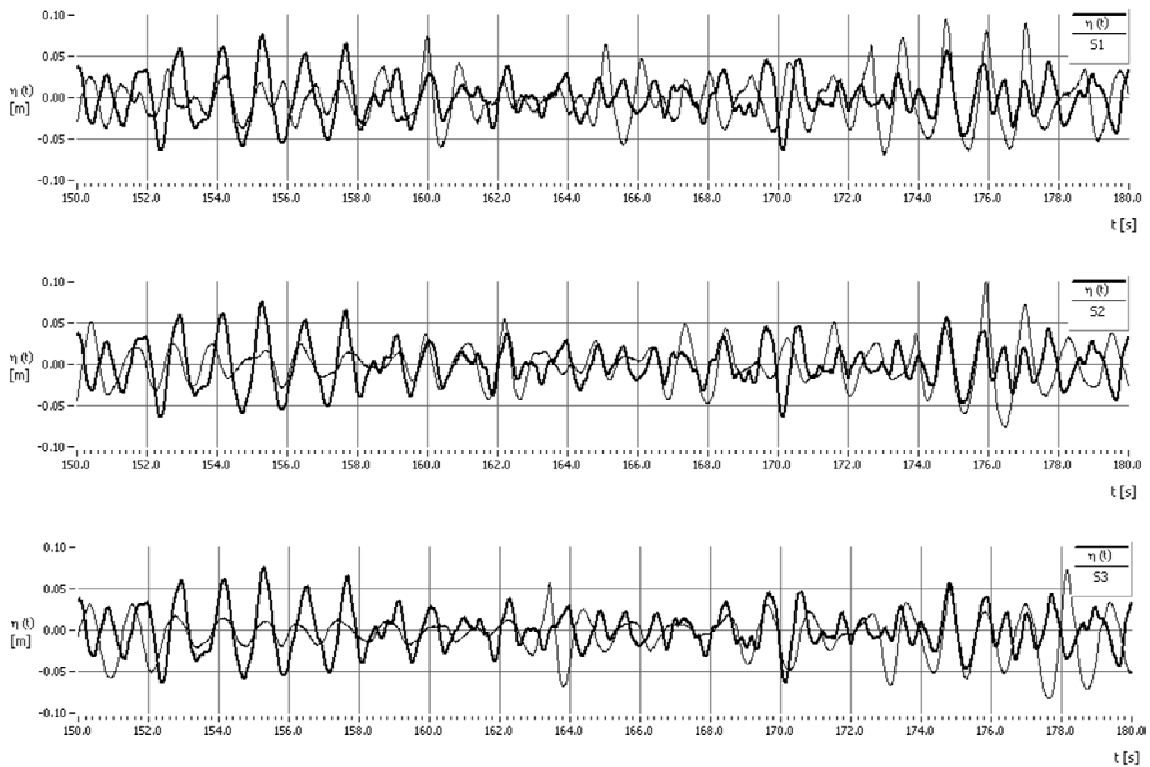
Por aplicação da Eq. (5-121), obtêm-se os seguintes intervalos de tempo  $t_s$  necessários para que uma onda de período  $T = 1.13$  s (período de pico do perfil **PS3**) percorra a distância do batedor às sondas S1, S2 e S3 (Fig. 5-34):

$$t_{s1} = 0.58 \text{ s}; \quad t_{s2} = 8.70 \text{ s}; \quad t_{s3} = 15.36 \text{ s}$$

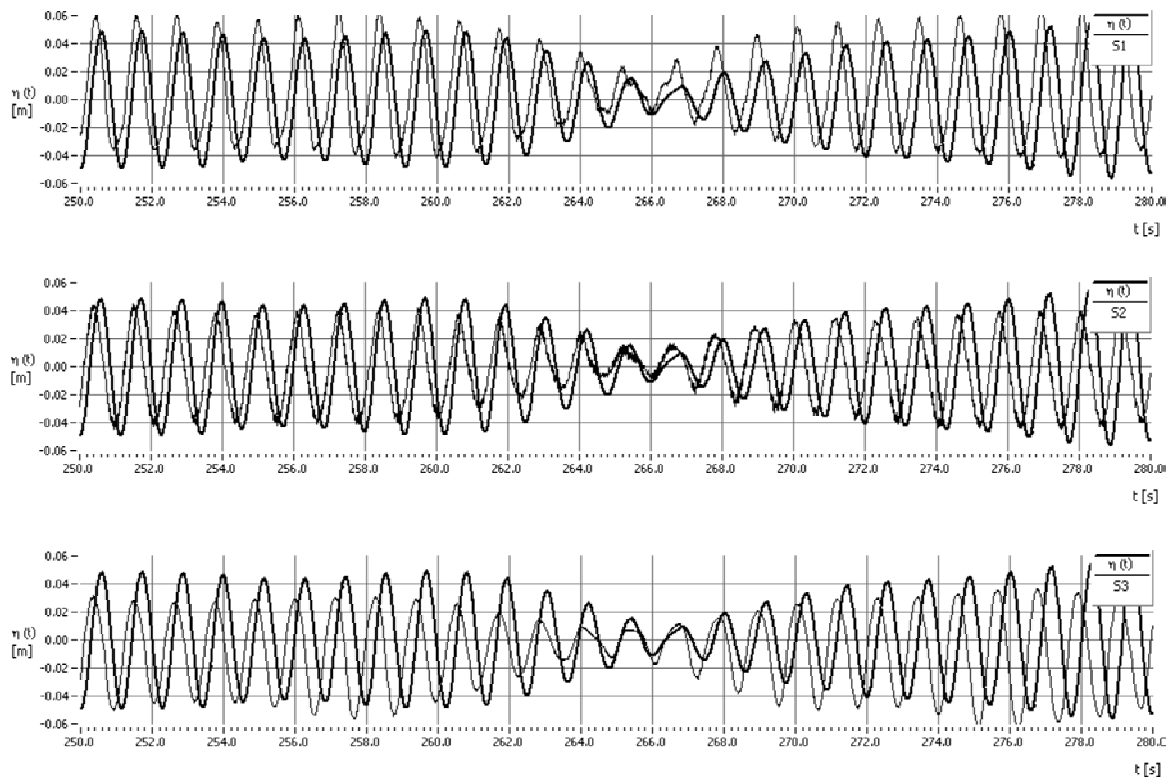
As Figs. 5-45 e 5-46 mostram dois exemplos de comparações entre os perfis pretendido e obtido nas três sondas indicadas.

Na Fig. 5-45, observa-se um trecho da comparação entre o perfil pretendido (**PS5**) e os perfis obtidos na água, para as três sondas mencionadas. Este trecho corresponde a uma duração de 30 s, entre os instantes  $t = 150$  s e  $t = 180$  s, sendo  $t = 0$  s o início do registo. Os desvios entre os registos pretendido e obtido são elevados, para qualquer das sondas, o que parece comprometer o sucesso da aplicação do método nesta situação. Mais para o fim do registo, notam-se desvios ainda maiores, para todas as sondas. Este exemplo considera, como se sabe, um perfil relativamente irregular (ver espectro na Fig. 5-41).

Na Fig. 5-46, fazem-se comparações semelhantes, agora para o perfil **PS3**, mais regular (espectro na Fig. 5-43). Esta figura mostra parte da comparação feita, correspondendo a um trecho do perfil próximo do fim do ensaio, entre os instantes  $t = 250$  s e  $t = 280$  s. Apesar disso, a concordância entre perfis pretendido e obtidos é bastante boa para qualquer das sondas, à parte uma visível desfasagem que se verifica em todas elas, sendo que esta desfasagem não se mantém constante ao longo de cada perfil, como se vai ver.

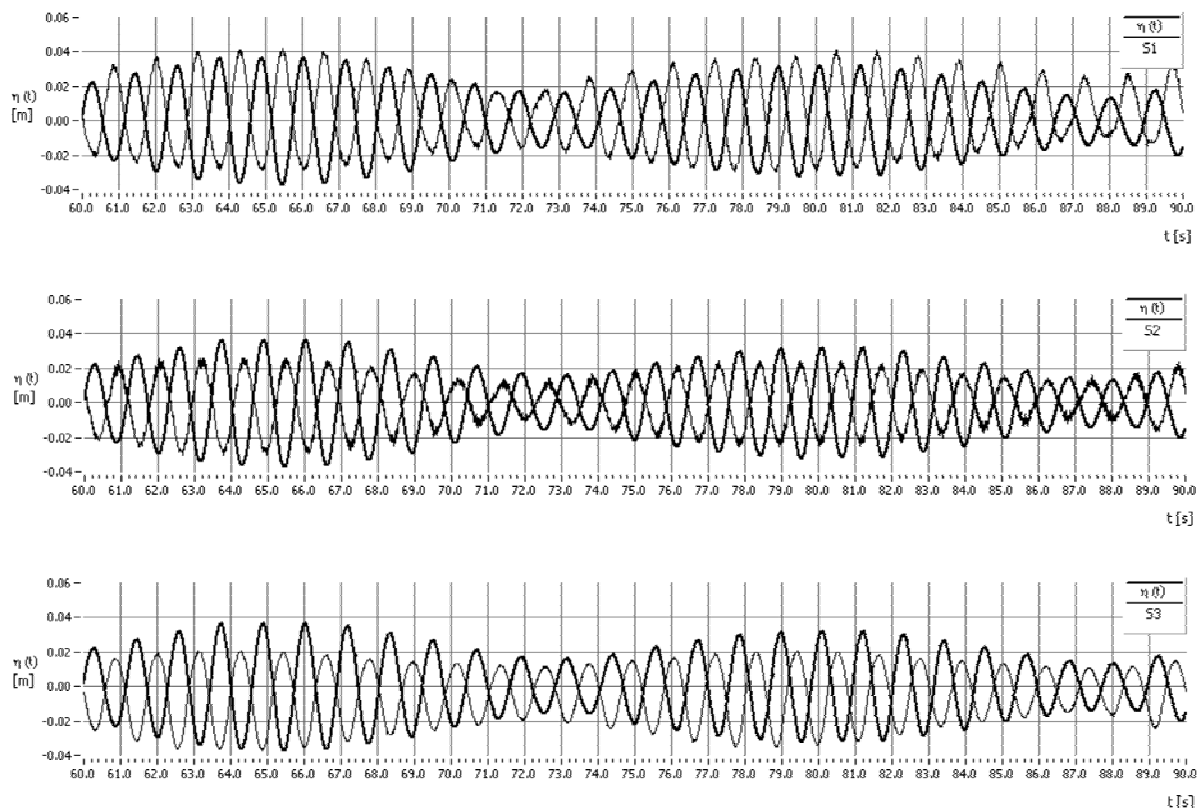


**Fig. 5-45 - Comparação PS5 – (150-180 s) - Situação B, para as Sondas S1, S2 e S3**



**Fig. 5-46 - Comparação PS3 – (250-280 s) - Situação B, para as Sondas S1, S2 e S3**

Verifica-se também que, para este perfil, à parte a referida desfasagem, a concordância mantém razoável qualidade tanto no final (Fig. 5-46) como no início (Fig. 5-47).



**Fig. 5-47 - Comparação PS3 – (60-90 s) - Situação B, para as Sondas S1, S2 e S3**

Também aqui, em todas as comparações, calcularam-se as alturas significativas e o desvio médio quadrático entre perfis pretendido e obtidos.

Visualmente, o método parece resultar. De notar, no entanto, que os valores do parâmetro que quantifica a comparação entre o perfil pretendido e obtido em qualquer das sondas [desvio médio quadrático, Eq. (5-120)] se apresentam muito elevados.

Conclui-se que as desfasagens que se observam entre o perfil obtido e o perfil pretendido (por vezes de  $180^\circ$ ) conduzem a valores elevados do desvio médio quadrático entre os ditos perfis. Este parâmetro não demonstra ser, portanto, o mais adequado para a comparação pretendida. No entanto, como não se encontrou outro mais acertado (para além do que decorre da observação visual – ver Fig. 5-51), os cálculos do Quadro 5-25, apresentado a seguir, foram efectuados continuando a usar o desvio médio quadrático como parâmetro de comparação.

Nesta situação, a média do desvio médio quadrático na sonda S1 é de  $0.0334\text{ m}$ , ou seja, cerca de 35% da altura significativa, o que é nitidamente um mau valor de concordância. As sondas S2 e S3 apresentam resultados igualmente maus: os respectivos valores médios dos desvios médios quadráticos são de  $0.0325\text{ m}$  e  $0.0293\text{ m}$  (34% e 30%, respectivamente).

**Quadro 5-25 - Comparações entre perfis pretendido e obtido – Situação B**

| Perfil                           | Descrição  | H <sub>ST</sub> (m) | T <sub>p</sub> (s) | Situação B (COM mudança de fases) |             |             |                     |              |              |                     |               |               |
|----------------------------------|--|---------------------|--------------------|-----------------------------------|-------------|-------------|---------------------|--------------|--------------|---------------------|---------------|---------------|
|                                  |  |                     |                    | G <sub>OPT</sub> (%)              |             |             | H <sub>SO</sub> (m) |              |              | D <sub>MQ</sub> (m) |               |               |
|                                  |  |                     |                    | S1                                | S2          | S3          | S1                  | S2           | S3           | S1                  | S2            | S3            |
| <b>PS1</b>                       | 1 seno   | 0.101               | 1.13               | 10.7                              | 11.9        | 12.6        | 0.057               | 0.044        | 0.029        | 0.0293              | 0.0267        | 0.0256        |
| <b>PS2</b>                       | 2 senos  | 0.087               | 1.13               | 10.3                              | 11.7        | 12.5        | 0.053               | 0.047        | 0.029        | 0.0256              | 0.0239        | 0.0222        |
| <b>PS2R</b>                      | 2 senos  | 0.087               | 1.13               | 10.1                              | 11.4        | 12.2        | 0.063               | 0.047        | 0.036        | 0.0267              | 0.0239        | 0.0228        |
| <b>PS3</b>                       | Com espectro JONSWAP muito estreito, $\gamma$ muito grande | 0.095               | 1.14               | 16.5                              | 19.1        | 19.6        | 0.096               | 0.102        | 0.079        | 0.0328              | 0.0310        | 0.0299        |
| <b>PS3A</b>                      | Com espectro JONSWAP muito estreito, $\gamma$ muito grande | 0.110               | 1.13               | 21.8                              | 25.3        | 25.9        | 0.115               | 0.126        | 0.096        | 0.0428              | 0.0391        | 0.0301        |
| <b>PS4</b>                       | Com espectro JONSWAP, $\gamma=7$                           | 0.100               | 1.13               | 28.7                              | 32.6        | 34.2        | 0.103               | 0.123        | 0.085        | 0.0368              | 0.0373        | 0.0319        |
| <b>PS5</b>                       | Com espectro JONSWAP, $\gamma=3.3$                         | 0.097               | 1.12               | 29.3                              | 33.5        | 34.7        | 0.102               | 0.094        | 0.088        | 0.0353              | 0.0343        | 0.0336        |
| <b>PS6</b>                       | Com espectro JONSWAP largo                                 | 0.100               | 1.16               | 27.0                              | 32.5        | 34.1        | 0.102               | 0.102        | 0.072        | 0.0358              | 0.0356        | 0.0317        |
| <b>PS7</b>                       | Com espectro JONSWAP muito largo                           | 0.095               | 1.25               | 26.1                              | 31.0        | 33.0        | 0.103               | 0.105        | 0.085        | 0.0355              | 0.0347        | 0.0318        |
| <b>PS8</b>                       | Com espectro Pierson-Moskowitz ITTC                        | 0.090               | 1.54               | 29.2                              | 32.4        | 33.6        | 0.097               | 0.102        | 0.078        | 0.0320              | 0.0328        | 0.0288        |
| <b>PS9</b>                       | Com espectro Pierson-Moskowitz Generalizado                | 0.097               | 1.14               | 23.9                              | 28.8        | 30.6        | 0.094               | 0.101        | 0.072        | 0.0345              | 0.0349        | 0.0310        |
| <b>PS10</b>                      | Com espectro Bretschneider-Mitsuyasu                       | 0.101               | 1.21               | 23.6                              | 29.1        | 30.5        | 0.087               | 0.099        | 0.072        | 0.0340              | 0.0358        | 0.0317        |
| <b>Médias</b>                    |  | <b>0.097</b>        | <b>1.18</b>        | <b>21.4</b>                       | <b>24.9</b> | <b>26.1</b> | <b>0.089</b>        | <b>0.091</b> | <b>0.068</b> | <b>0.0334</b>       | <b>0.0325</b> | <b>0.0293</b> |
| <b>Desvio em relação à média</b> |  |                     |                    |                                   |             |             | <b>-8%</b>          | <b>-6%</b>   | <b>-29%</b>  | <b>35%</b>          | <b>34%</b>    | <b>30%</b>    |

Como se disse, embora em termos globais, “visualmente”, o método aqui apresentado com a correcção de fases pareça resultar bem, é de notar que os valores do parâmetro que quantifica a comparação entre o perfil pretendido e obtido em qualquer das sondas se apresentam muito elevados.

Como se pode verificar na Fig. 5-48, que mostra um extracto da comparação no intervalo entre 0 e 50 s, utilizando o módulo SAM MOD 9-2 (Comparação de Registos), apesar de a envolvente dos perfis obtido e pretendido serem praticamente idênticas, as ondas, nesse período, estão quase em oposição de fase, o que justifica o facto de se obterem (nesse período de tempo em particular) desvios médios quadráticos elevados.

Parece que bastaria uma correcção de fase (neste caso, de aproximadamente  $180^\circ$ ) ao longo do perfil obtido para eliminar essa desfasagem e, assim, obter perfis mais concordantes.

Infelizmente, isso não resulta, visto que, por exemplo, a desfasagem que existe no intervalo de tempo mostrado na Fig. 5-48 (0-50 s de um registo do tipo **PS3A**) não é a mesma que se apresenta noutros intervalos do mesmo sinal, nomeadamente no que é apresentado na Fig. 5-49 (pequena desfasagem), ou no da Fig. 5-50 (desfasagem quase nula).

A Fig. 5-51 mostra a totalidade da comparação referida (perfil **PS3A**). Como se vê, de modo geral, visualmente, o registo obtido (a amarelo) acompanha bem o perfil pretendido (a branco).

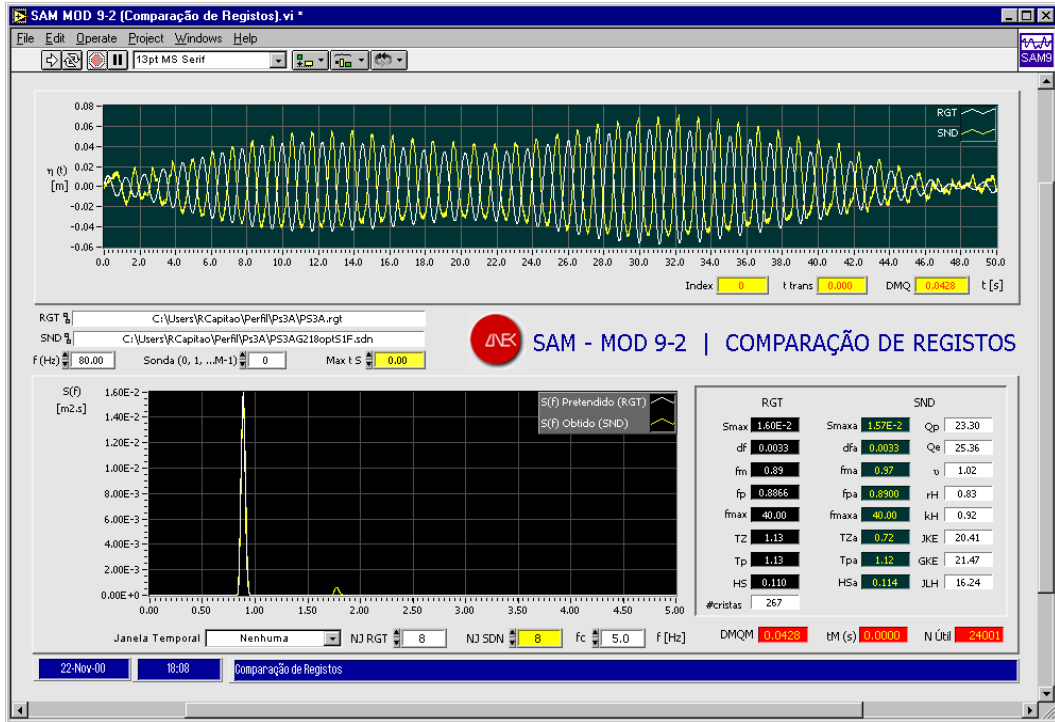


Fig. 5-48 - Comparação do perfil pretendido (PS3A) com o perfil obtido na sonda S1 - Situação B (0-50 s)

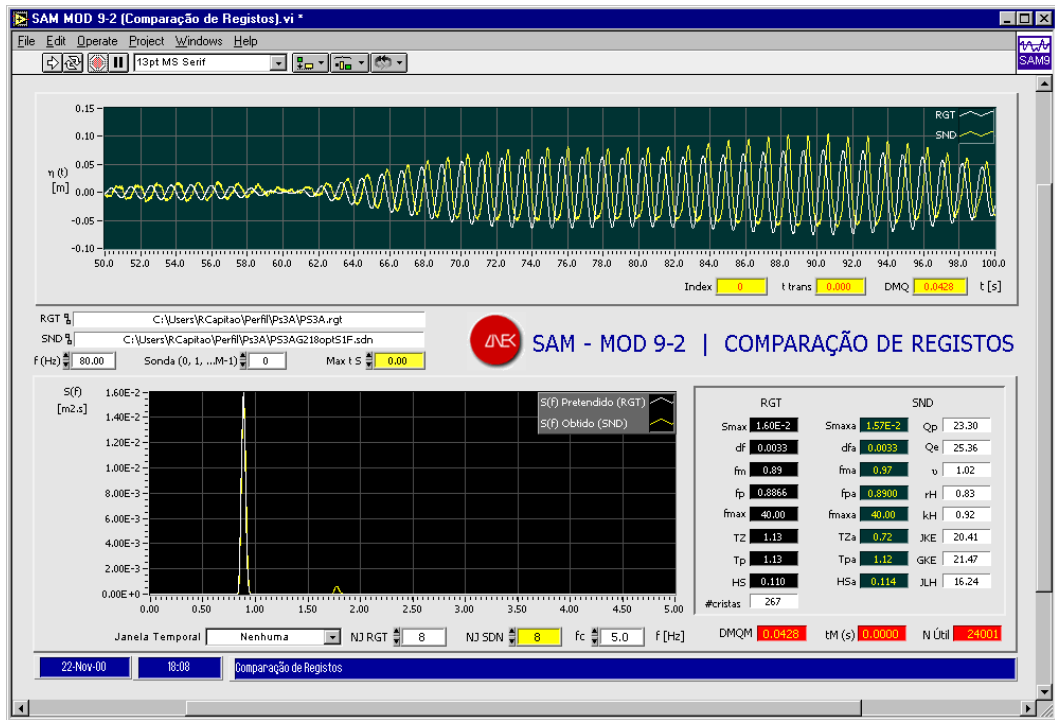
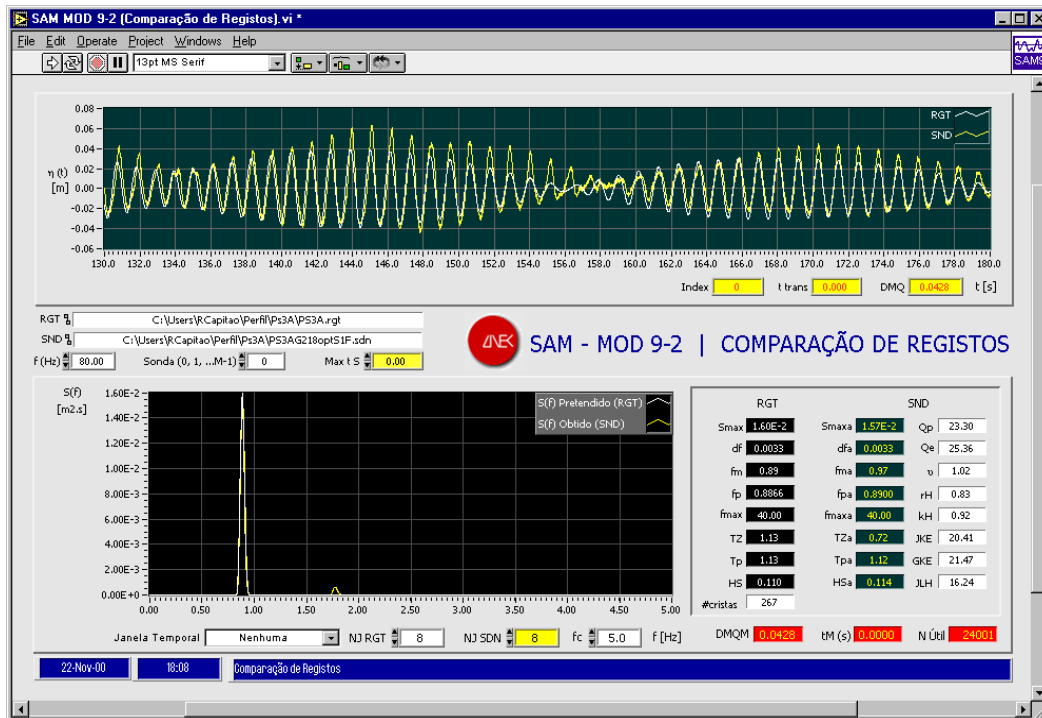
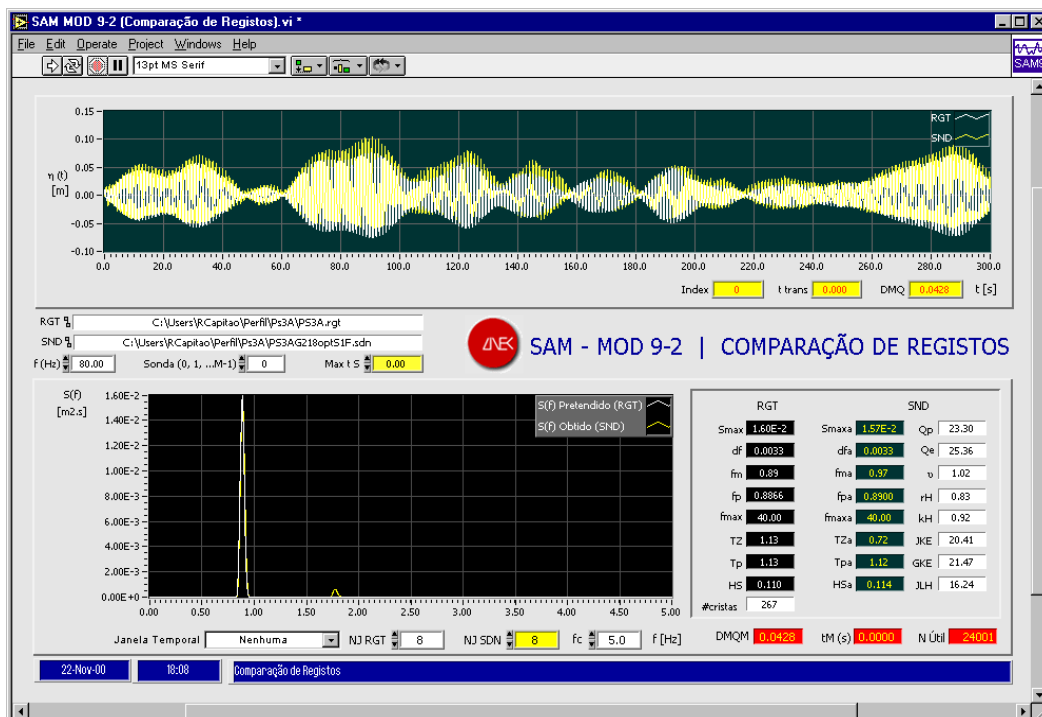


Fig. 5-49 - Comparação do perfil pretendido (PS3A) com o perfil obtido na sonda S1 - Situação B (50-100 s)





**Fig. 5-50 - Comparação do perfil pretendido (PS3A) com o perfil obtido na sonda S1 - Situação B (130-180 s)**



**Fig. 5-51 - Comparação total do perfil pretendido (PS3A) com o perfil obtido na sonda S1 - Situação B**

Da análise dos resultados obtidos para as duas situações consideradas nesta secção, conclui-se que a transformação  $W$  do perfil desde o batedor até ao local onde se pretende obter o perfil não é nem a transformação identidade (deslocamento rígido do perfil) nem linear.

Dos resultados obtidos para as situações A e B, verifica-se que as melhores concordâncias se obtêm para a primeira situação, isto é, quando apenas se procede a um deslize no tempo do registo obtido na água, sem qualquer correcção prévia das fases. A Situação B apresenta desvios médios quadráticos claramente superiores aos da Situação A, pelo que se conclui que a mudança das fases nos registos das sondas, admitindo a linearidade de  $W$ , piora os resultados.

Conclui-se assim, finalmente, tendo em consideração os ensaios físicos efectuados, que a deslocação do perfil ao longo do canal se comporta como aproximadamente rígida, embora com decréscimo progressivo das amplitudes, que se pode atribuir à progressiva perda de energia ao longo do trajecto das ondas.

Para concluir este estudo, efectuaram-se mais dois conjuntos de ensaios utilizando os mesmos registos considerados nas secções anteriores, correspondentes a duas profundidades diferentes no canal ( $d = 0.47\text{ m}$  e  $0.67\text{ m}$ ). Estes ensaios visaram analisar a influência da profundidade nos parâmetros de reflexão, a qual, como se sabe, é o principal factor de erro nos métodos apresentados. Os poucos ensaios efectuados não permitiram chegar a quaisquer conclusões com suficiente relevância, razão pela qual não são apresentados quaisquer resultados. Na verdade, o número de ensaios (dois perfis, com três profundidades) efectuados é insuficiente para tirar conclusões válidas. Por outro lado, importa notar que os ensaios considerados se referem apenas a situações de profundidade intermédia. Realmente, o canal utilizado não permite conseguir condições de grande profundidade para períodos de onda "realistas" em ensaios laboratoriais típicos. Este assunto deverá ser retomado mais tarde, fora do âmbito do presente trabalho, para obtenção de ensaios sistemáticos.

#### 5.7.1.7 COMENTÁRIOS FINAIS

Dos resultados dos ensaios físicos efectuados, salientam-se os seguintes comentários sobre o método da integração da velocidade horizontal modificado, apresentado nesta secção:

- 1** O método aqui ensaiado permite reproduzir em laboratório, num canal ou tanque bidimensional, um dado perfil da superfície da água (por exemplo, um registo de agitação natural ou um registo simulado), com um dado espectro, à distância  $x_0$  do batedor.
- 2** O módulo LabVIEW, **SAM MOD 1-3 (Perfil Dado)** está plenamente funcional e interage com os restantes módulos do pacote de *software* geral **SAM**.
- 3** Apesar de se terem tomado precauções para que não houvesse reflexões no canal, estas, na realidade, existem, ainda que bastante moderadas, pelo que os resultados de qualquer método, por melhor que este seja, serão sempre "corrompidos" pela reflexão.
- 4** Conclui-se que a transformação,  $W$ , desde o batedor até ao local onde se pretende obter um dado perfil de onda é não linear.

- 5** Verifica-se, porém, que a deslocação do perfil ao longo do canal se comporta como aproximadamente rígida, para as distâncias percorridas no canal utilizado.
- 6** Assim, tendo em consideração os ensaios físicos efectuados e os resultados obtidos, e considerando que o objectivo deste estudo era o de produzir em canal de ondas irregulares um perfil de onda com o menor desvio possível em relação a um perfil de onda dado, dá-se preferência à aplicação do método da integração da velocidade horizontal nas condições correspondentes à Situação A.

### 5.7.2 MÉTODO DA TEORIA DOS FILTROS

No método da teoria dos filtros faz-se uso da teoria dos sistemas lineares. Utilizando a mesma notação da Secção 2.5, e continuando a admitir que o sistema  $\{x(t), \eta(t)\}$  é linear e invariante no tempo, a sua função de resposta a impulso é dada por

$$h(t) = TF^{-1}[H(f)] = TF^{-1}\left[\frac{S_{x\eta}(f)}{S_x(f)}\right] \quad (5-122)$$

sendo

$H(f)$  - a função de transferência entre  $x(t)$  e  $\eta(t)$ ;

$S_x(f)$  - o espectro de  $x(t)$ ;

$S_{x\eta}(f)$  - o espectro cruzado de  $x(t)$  e  $\eta(t)$  - ver 2.4.1.

Por outro lado, da Eq. (2-21), retira-se:

$$\eta(t) = \int_{-\infty}^t h(t-\tau) x(\tau) d\tau \quad (5-123)$$

cuja discretização conduz a (Carvalho, 1990):

$$\eta_i = \sum_{k=0}^i h_{i-k} x_k \quad (5-124)$$

tendo que se arbitrar um valor inicial  $x_0$ . Desenvolvendo agora os primeiros termos da série, vem:

$$\eta_0 = h_0 x_0 \quad \text{donde } x_0 = \frac{1}{h_0} \eta_0$$

$$\eta_1 = h_0 x_1 + h_1 x_0 \quad \text{donde } x_1 = \frac{1}{h_0} [\eta_1 - h_1 x_0]$$

$$\eta_2 = h_0 x_2 + h_1 x_1 + h_2 x_0 \quad \text{donde } x_2 = \frac{1}{h_0} [\eta_2 - h_1 x_1 - h_2 x_0]$$

Isto permite a seguinte generalização:

$$x_n = \frac{1}{h_0} \left[ \eta_n - \sum_{k=1}^n h_{in} x_{n-k} \right] \quad (5-125)$$

Deste modo, se for dado um conjunto de pontos da elevação da superfície que se pretende num dado ponto  $\{\eta_i\}$ , pode calcular-se o conjunto de pontos do movimento do batedor  $\{x_i\}$ , o que permite a obtenção de uma função aproximada  $x(t)$  necessária para obter, no ponto referido, o perfil pretendido  $\eta(t)$ .

Este método não é considerado no presente trabalho e não está ainda incluído no pacote **SAM**.

### 5.7.3 MÉTODO DA DECOMPOSIÇÃO DE FOURIER

Neste método há também uma decomposição do perfil pretendido,  $\eta(t)$ , nas suas componentes sinusoidais. Evidentemente, este método também pressupõe a linearidade do sistema  $x(t) \rightarrow \eta(t)$ . Assim, nestas condições, tal como se fez em 5.7.1:

- 1 Dado o registo das elevações da superfície da água,  $\eta(t)$ , determinam-se, para cada uma das suas  $N$  harmónicas, as constantes  $a_n$  (amplitude) e  $\varphi_n$  (fase) usando a análise de Fourier.

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N a_n \cos \left( 2\pi \frac{n}{T_R} t + \varphi_n \right) \quad (5-126)$$

- 2 Cada sinusóide assim determinada é, mediante retroversão [de acordo com a fórmula de Biéssel-Suquet apropriada, Eq. (5-9) ou Eq. (5-10)], transformada numa nova sinusóide com novas amplitudes  $a_n^*$ , que substituem  $a_n$  na Eq. (5-126).

Deste modo, o sinal  $x(t)$  que se tem de fornecer ao batedor de ondas para produzir o perfil pretendido é:

$$x(t) = \sum_{n=1}^N a_n^* \cos \left( 2\pi \frac{n}{T_R} t + \varphi_n \right) \quad (5-127)$$

- 3 Tanto  $\eta(t)$  como  $x(t)$  têm que ser multiplicadas por constantes. No caso de  $x(t)$ , a constante é um factor de conversão, de *metros* para *Volts*; no caso de  $\eta(t)$ , é um factor de escala, Eq. (5-4). Também, se se pretender o perfil num ponto distante do batedor, ter-se-á que empregar um procedimento semelhante ao utilizado no método da integração da velocidade horizontal para transformar as fases  $\varphi_n$  em  $\phi_n$ , Eq. (5-116).

Também este método não é considerado no presente trabalho nem está incluído no pacote **SAM**.

## 5.8 GERAÇÃO DA ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE COM ESPECTRO E GRUPOS DE ONDAS ESPECIFICADOS

Com os resultados alcançados na Secção 5.7, com o método da integração da velocidade horizontal, facilmente se possibilita a geração física de elevações da superfície com espectro e grupos de ondas pré-especificados. Trata-se simplesmente de usar os métodos numéricos apresentados em 4.3 (usando, nomeadamente, o *Método da Escalagem*, tratado em 4.3.1.2, ou o *Método da Simulação Condicionada*, apresentado em 4.3.3), para construir um sinal numérico com as características pretendidas já referidas e, depois, usar o método de geração de perfis de elevação da superfície da água que se apresentou em 5.7. Neste caso, o perfil de elevação considerado é precisamente o sinal numérico simulado com um dos referidos métodos da escalagem ou da simulação condicionada.

## 5.9 CONCLUSÕES

Apresentaram-se neste capítulo diversos métodos para simulação física de ondas irregulares com base num espectro, num espectro e grupos de ondas e apenas num registo.

Assim, após alguns tópicos importantes sobre simulação física, começou-se por apresentar o método clássico das fases aleatórias, que tem por objectivo a geração de elevações da superfície com espectro especificado. Apresentaram-se os fundamentos deste método de síntese de séries temporais e os procedimentos habitualmente seguidos nos ensaios físicos, usando este método. Abordou-se também um outro método, o da filtragem electrónica de ruído branco, que produz resultados idênticos ao anterior.

É sabido que quando se efectuam ensaios em canais ou tanques de ondas, há, infelizmente, agitação reflectida pelos modelos em ensaio que se sobrepõe à agitação incidente, reflectindo-se novamente nos geradores de ondas. Com vista a uma eventual compensação dos movimentos do gerador de ondas, por forma a que as ditas reflexões (e re-reflexões) se tornem desprezáveis ou nulas, é de toda a utilidade separar a agitação incidente da agitação reflectida no canal.

Existem vários métodos para esse efeito. Consideraram-se neste trabalho o *método das duas sondas* e o *método das M sondas*. Estes métodos permitem a obtenção dos espectros incidente e reflectido da agitação irregular não-direccional, a partir dos espectros observados em dois ou mais pontos situados ao longo de uma recta paralela à direcção de propagação da agitação que incide sobre uma estrutura reflectora. Esta apresentação é necessária dado que se encontra quase sempre incompleta na literatura. A eficácia dos métodos foi comprovada por análise dos resultados de alguns ensaios físicos efectuados num canal de ondas irregulares.

Em ambos os métodos, dos testes numéricos efectuados, verificou-se uma total coincidência dos espectros incidentes reconstituídos com os espectro incidentes iniciais. Verificou-se ainda que o coeficiente de reflexão obtido, calculado quer para cada frequência do espectro, quer através dos

momentos de ordem zero, se aproximou do coeficiente arbitrado de início, coincidindo mesmo para as frequências de interesse. Estes resultados comprovaram a exactidão teórica de ambos os métodos.

Por outro lado, os resultados obtidos no canal de ondas irregulares são razoavelmente bons e substancialmente melhores quando se utiliza o método das  $M$  sondas, isto é, usando mais do que 2 sondas. Desses resultados conclui-se também que, para as condições do canal de ondas irregulares utilizado, a reflexão é um fenómeno importante para as frequências que contêm mais energia e que o coeficiente de reflexão apresenta um valor superior para o caso da utilização de espectros estreitos.

No âmbito da verificação dos métodos de separação acima mencionados e com o objectivo inicial de conseguir uma praia com reflexão mínima, efectuou-se também uma primeira avaliação da reflexão em canais de ondas irregulares considerando uma praia reflectora com a inclinação 1:1. Para esta inclinação de praia, obtiveram-se valores do coeficiente de reflexão elevados, da ordem dos 50%. Como se esperava, a reflexão não pode, nestas condições, ser desprezada. Para praias com inclinação bastante mais suave (1:20), obtiveram-se valores de coeficiente de reflexão bastante inferiores, com média de 17% (Fig. 5-38).

Um aspecto importante que foi verificado é que, na prática, após um período inicial do registo que varia conforme os períodos das ondas geradas no canal, estas passam a ter uma composição fruto das ondas incidentes, das ondas reflectidas pela praia ou pela estrutura em ensaio (e, até aqui, o modelo de separação de espectros incidente e reflectido "funciona" correctamente), das ondas re-reflectidas pelo batedor, e de outras multi-reflexões que infelizmente ocorrem no canal. Esta situação é prejudicial à aplicação do referido método de separação de espectros, uma vez que contraria as condições de aplicabilidade do modelo.

Por outro lado, sabe-se que, quanto maior o período, mais rapidamente a onda reflectida alcança o batedor, sendo novamente re-reflectida, e assim sucessivamente. Este problema poderá ser parcialmente controlado, posicionando-se as sondas o mais distante possível do batedor. Para avaliar as re-reflexões, propõe-se a utilização do índice de re-reflexão,  $i_{RR}$ , dado pela Eq. (5-103). Este índice deverá ser utilizado nos futuros ensaios a efectuar para o estudo da reflexão de praias com outras inclinações. Recomenda-se, também, que nesses ensaios sejam observadas as distâncias entre sondas preconizadas por Goda, 1985, a fim de se evitarem instabilidades numéricas.

Quando há obstáculos no canal, há que proceder a uma compensação do gerador de ondas por forma a eliminar uma segunda reflexão, no batedor, da agitação reflectida por esses mesmos obstáculos.

Tem muito interesse obter-se, em laboratório, não apenas um registo qualquer de espectro conhecido, mas um perfil exacto da superfície da água num dado ponto, por exemplo, um registo conhecido de um certo temporal ou um registo com certos grupos de ondas.

O método da integração da velocidade horizontal, tal como foi apresentado por Gravesen *et al.*, 1974, serviu como ponto de partida para uma sua modificação por forma a permitir a obtenção de

perfis de onda pré-especificados, quer junto ao batedor, quer num outro local do canal, assim como para permitir a sua utilização em águas intermédias ou mesmo profundas.

Concluiu-se, dos ensaios físicos efectuados, que este método permite reproduzir muito bem em laboratório perfis da superfície da água pré-especificados (por exemplo, um registo de agitação natural ou um registo simulado numericamente, com um dado espectro), à distância  $x_0$  do batedor. Para isso, será necessário utilizar o módulo **SAM MOD 1-3 (Perfil Dado)** do pacote de *software* geral **SAM**, realizado no âmbito deste trabalho. Verifica-se, porém, que há sempre reflexões no canal; os consequentes problemas foram neste trabalho minimizados, mediante a utilização de uma praia de absorção bastante suave na extremidade do canal.

Concluiu-se também que a transformação do perfil desde o batedor até ao local onde está a sonda é não linear. No entanto, verificou-se que a deslocação do perfil ao longo do canal se comporta como aproximadamente rígida, para as distâncias percorridas no canal utilizado, pelo que, considerando que o objectivo desta parte do estudo era o de produzir em canal de ondas irregulares um perfil de onda, com o menor desvio possível em relação a um perfil de onda dado, deverá ser dada preferência à aplicação do método que admite que o perfil da onda se desloca ao longo do canal de forma aproximadamente rígida.

Apesar de, como se disse na Secção 5.6, não se possuir ainda de um mecanismo de absorção das reflexões, facilmente se geram no canal ou tanque elevações da superfície da água com espectro e grupos de ondas pré-especificados, usando este último método juntamente com um dos métodos numéricos de construção de sinais, nomeadamente o *método da escalagem*, tratado em 4.3.1.2, ou o *método da simulação condicionada*, apresentado em 4.3.3).





# PARTE III



# CAPÍTULO 6 - SOFTWARE DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA E FÍSICA

---

## 6.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo, apesar de relativamente curto, representa aproximadamente metade do volume de trabalho desta dissertação de doutoramento. Ele respeita fundamentalmente à programação computacional de um pacote integrado de programas de computador (*software*) a que foi dado o nome de **SAM** (acrónimo de **S**imulação da **A**gitação **M**arítima). O pacote **SAM**, já referido várias vezes ao longo dos capítulos anteriores, representa, assim, o resultado mais evidente e prático do trabalho de doutoramento. Pretende-se que este capítulo sirva também como manual de utilização, pelo que o formato dessa descrição é o normalmente utilizado em manuais de *software*.

O pacote **SAM** terá utilização em canais ou tanques de ondas irregulares de laboratórios de hidráulica marítima e destina-se à caracterização, simulação, geração e aquisição da agitação marítima. É constituído por nove módulos principais de programação, interligados, respeitantes às diversas fases seguidas num ensaio típico (Fig. 6-1):

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

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*. São, à frente, apresentados exemplos destes painéis.

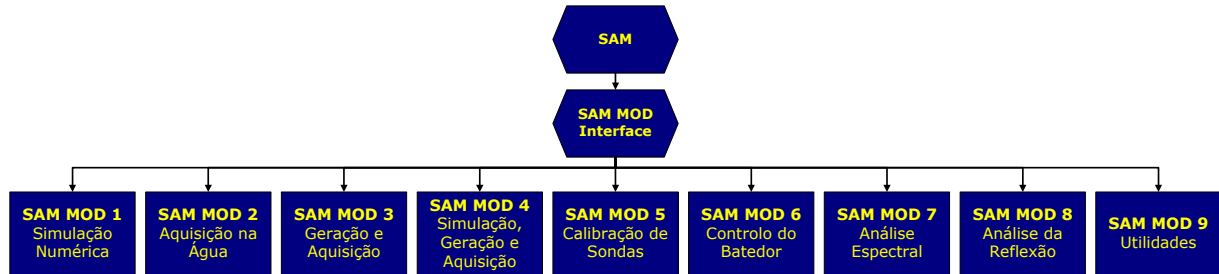


Fig. 6-1 - Estrutura do pacote de *software* SAM (Simulação da Agitação Marítima)

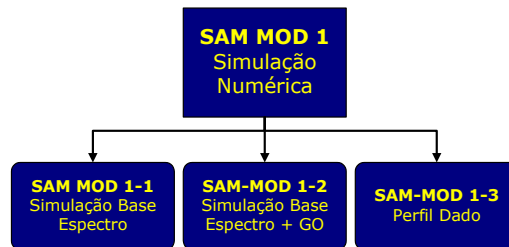


Fig. 6-2 - Estrutura do módulo SAM MOD 1 (Simulação Numérica)

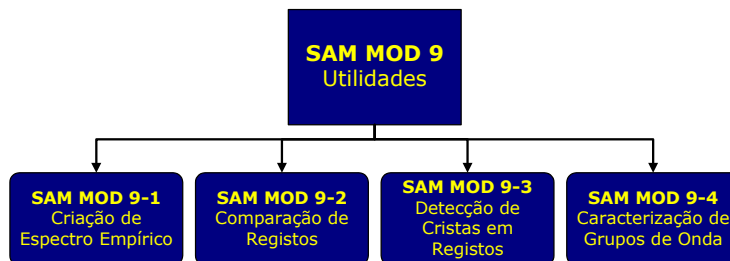


Fig. 6-3 - Estrutura do módulo SAM MOD 9 (Utilidades)

No que se segue, tentar-se-á dar uma descrição o mais completa possível (dentro das limitações próprias das descrições do tipo computacional) de cada um destes módulos e, quando aplicável, dos seus respectivos sub-módulos.

Para facilitar a escrita e a compreensão do texto, considera-se que uma dada sequência de comandos fornecida ao computador é sistematicamente escrita da seguinte forma e ordem: **Comando 1>Comando 2> Comando 3>...**, e que os ficheiros de dados utilizados nos exemplos estão escritos da seguinte forma: "Ficheiro.DAD". Quando se omite o caminho (*path*) de um determinado ficheiro, isto significa que aquele se encontra no mesmo directório onde está instalado o pacote SAM.

Uma descrição do conteúdo de cada um dos módulos poderá ser consultada nos diversos menus de Ajuda (ou *Help*), presentes em todos os módulos e accionados pelos comandos **Alt>Help>Online Help for "nome do módulo"** ou **Alt>Help>Show Help**, como se explica na Secção 6.3 mais à frente. O painel principal, a partir do qual se podem chamar todos os módulos e sub-módulos, é o *painel de Interface, SAM MOD (Interface)*.

## 6.2 ESPECIFICAÇÕES DE SOFTWARE E HARDWARE

O pacote **SAM** foi realizado mediante utilização do ambiente de programação LabVIEW, acrónimo para **L**aboratory **V**irtual **I**nstrument **E**ngineering **W**orkbench, o qual permite a criação de programas utilizando uma linguagem gráfica denominada *G* (de **G**raphical language). O ambiente LabVIEW permite, assim, desenvolver e executar programas usando código *G*.

A linguagem de programação *G* distingue-se das linguagens tradicionais (*Fortran, Pascal, C, etc.*) pela forma gráfica como é apresentado o código, o qual é construído sobre ficheiros de extensão *.vi*, do inglês *"Virtual Instrument"*.

A Fig. 6-4 apresenta um pormenor de um programa do pacote **SAM** em código *G* típico. No **Anexo 6 - Lista de Módulos e Rotinas SAM** é apresentada a quase totalidade do código das principais rotinas do pacote **SAM**.

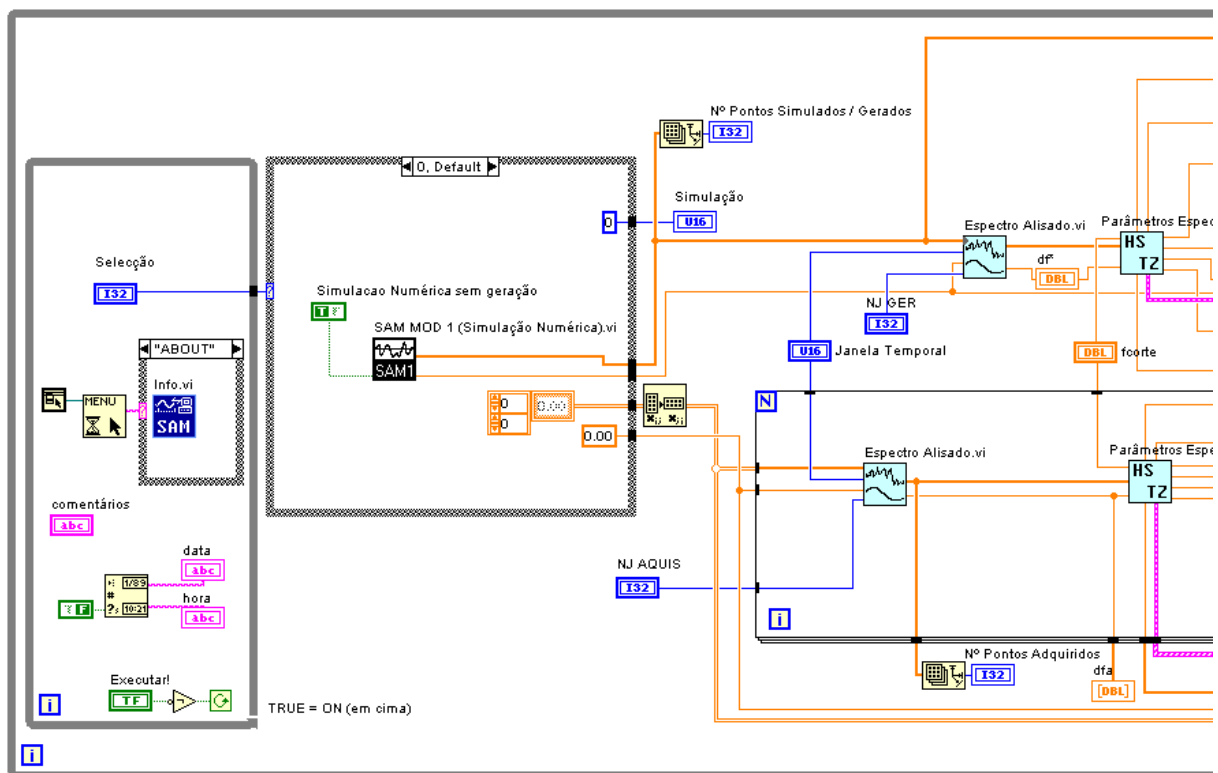


Fig. 6-4 - Pormenor de um programa em *G* (extensão *.vi*), em ambiente LabVIEW

O ambiente de programação *LabVIEW* foi especialmente concebido para operações de análise e processamento de sinais, assim como para todos os aspectos relacionados com aquisição e geração de sinais eléctricos. Este ambiente apresenta uma interface com o utilizador especialmente versátil. Por outro lado, permite a utilização de uma biblioteca de módulos de aquisição já programados, que tornam possível a aquisição e geração simultânea de sinais na água de um canal.

O ambiente *LabVIEW* permite, assim, a criação dos chamados *Instrumentos Virtuais (Virtual Instruments)*, uma vez que, com a intervenção de um computador, de uma placa de aquisição e geração de sinais eléctricos e de *software* produzido em *G*, possibilita o controlo de um determinado processo, sem necessidade de outros instrumentos (reais) de controlo. Um exemplo de instrumento virtual que pode ser realizado facilmente é um osciloscópio. Para além de ser mais barato, a vantagem imediata de um instrumento virtual, em relação ao correspondente instrumento real, é claramente o facto de a qualquer momento se poder (através de *software*) modificar as suas características.

O pacote de *software SAM* foi realizado tendo em vista a utilização em PC's com sistemas operativos *Windows 9X/NT/2000/ME/XP* ou similar. Outros sistemas (*Mac OS, Sun SPARCstations, HP 9000/700 HP-UX*), apesar de não terem sido testados, facilmente poderão ser incluídos, se necessário. Obviamente que, para além do que é considerado actualmente básico em termos de *hardware* (placa gráfica, *motherboard*, etc.), para correr a versão executável do pacote **SAM** é necessário que o computador possua (ou que este remotamente possa utilizar) uma placa de geração e aquisição de dados (DAQ) adequada (Fig. 5-3). Por exemplo, para se poder usar o módulo **SAM MOD 3 (Geração e Aquisição)**, é necessário ou dispor de uma placa de aquisição e geração de dados, compatível com a linguagem *G* (por exemplo, uma qualquer placa DAQ *National Instruments*) ou aceder remotamente a uma placa DAQ compatível que funcione como servidor remoto, através de certo protocolo de transmissão, por exemplo TCP/IP.

A placa de geração e aquisição de dados utilizada neste estudo permite, como se disse no capítulo anterior, a geração simultânea em 2 canais e, ao mesmo tempo, a aquisição simultânea em 8 outros canais (em *modo diferencial*).

Para executar qualquer dos módulos que constituem o pacote **SAM** é necessário que, ou esteja instalada uma versão do ambiente de programação gráfica *LabVIEW*, ou haja uma versão executável realizada naquele ambiente com utilização do *add-in "LabVIEW Application Builder"*. No disco compacto (CD) que acompanha esta dissertação, as aplicações foram construídas utilizando aquele *add-in*, pelo que podem ser executadas isoladamente, sem necessidade de instalação do editor *LabVIEW*.

Contudo, para executar qualquer dos módulos, há que primeiramente instalar o *Visualizador LabVIEW (LabVIEW RunTime Viewer)*.

Após essa instalação, podem executar-se os módulos pretendidos através da utilização da versão executável (.exe), utilizando **Start>Run>SAM**, conforme instruções a seguir.

Para instalar o visualizador LabVIEW e o pacote **SAM** num computador com sistema operativo *Windows 9X/NT/2000/ME/XP* deve-se, no CD fornecido com esta dissertação, fazer o seguinte:

- 1** Executar o programa "Setup" de instalação do visualizador LabVIEW, através do seguinte comando: **Start>Run>[D:]\Installer\disks\Setup.exe**;
- 2** Seguir as instruções do programa de instalação do visualizador LabVIEW;
- 3** O pacote **SAM** será executado logo após a instalação;
- 4** Execuções posteriores do pacote **SAM** podem ser efectuadas através do menu "**Start>Programs>SAM - Simulação da Agitação Marítima**" ou mediante o comando: **Start>Run>[Caminho de localização do pacote SAM]\SAM1.exe** ou **SAM2.exe**, conforme o que se segue:

**SAM1** - O computador onde se executa a aplicação **SAM** possui uma placa de geração e aquisição de dados (DAQ) e respectivos "drivers". Neste caso, será utilizada a versão completa do pacote, com possibilidades de simulação, geração, aquisição e análise da agitação marítima gerada em canais ou tanques de ondas irregulares;

**SAM2** - O computador não possui placa de geração e aquisição de dados. Neste caso, será permitida uma versão bastante reduzida e limitada do pacote, apenas com capacidade para simular numericamente agitação marítima e para realizar a análise de sinais numéricos ou guardados em ficheiro. Nestas circunstâncias, os módulos **SAM MOD 2 (Aquisição na Água)**, **SAM MOD 3 (Geração e Aquisição)**, **SAM MOD 4 (Simulação, Geração e Aquisição)**, **SAM MOD 5 (Calibração de Sondas)** e **SAM MOD 6 (Controlo do Batedor)** não estarão acessíveis ao utilizador.

Para utilizações posteriores à primeira, deve-se seguir apenas o último passo. Estas instruções constam da literatura inclusa no referido CD.

Evidentemente, os exemplos apresentados neste capítulo consideram a versão completa do pacote **SAM**.

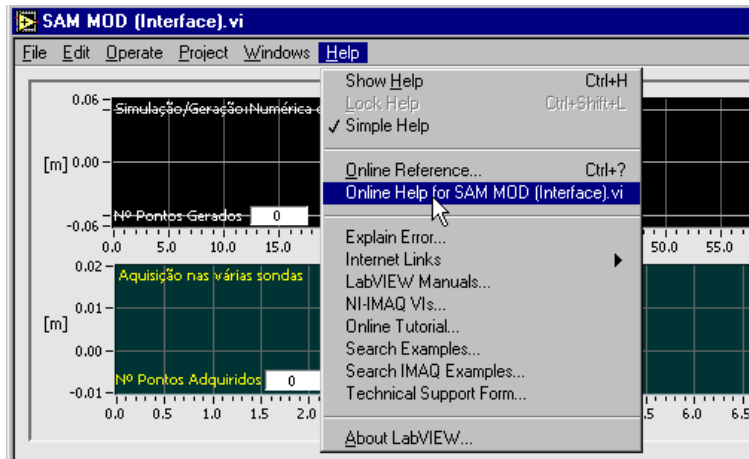
## 6.3 SISTEMA DE MENUS DE AJUDA AO UTILIZADOR

### 6.3.1 INTRODUÇÃO

Utiliza-se em todos os módulos um conjunto de menus típico dos sistemas *Windows 9X/NT/2000/ME/XP*. Para construir os livros e respectivos capítulos deste *Sistema de Menus de Ajuda Geral (Help)*, utilizou-se o utilitário "Microsoft Help Workshop". Este programa permite criar ficheiros de ajuda, de extensão (.hlp), editar ficheiros de projecto e de índices de conteúdo, assim como o posterior teste. Basicamente, o programa "Microsoft Help Workshop" obtém a informação dos diversos livros de ajuda (considerou-se um livro por módulo) e combina os seus capítulos (to-

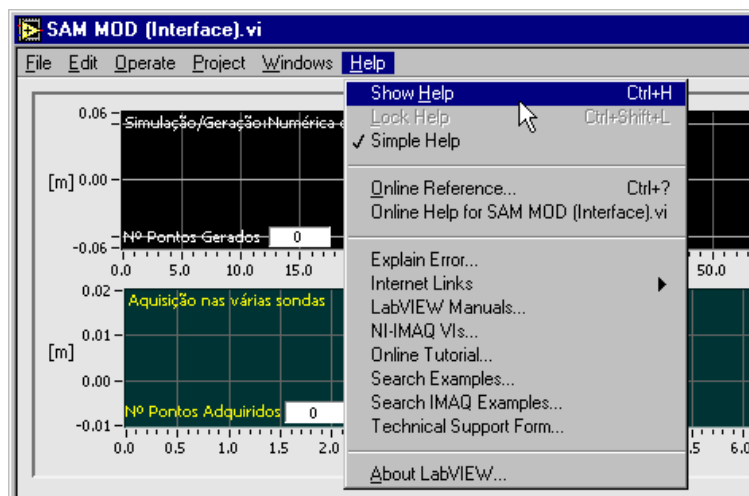
*pics*) em formato (.rtf) num ficheiro único de ajuda (*Help file*), de modo a ser utilizado pela aplicação "Microsoft Windows Help" existente em qualquer sistema operativo MS Windows 9X/NT/2000.

O Sistema de Menus de Ajuda Geral (Fig. 6-5) é accionado, em qualquer módulo, pelo comando **Alt>Help>Online Help for "nome do módulo"**, e é descrito a seguir em 6.3.2.



**Fig. 6-5 - Chamada do menu de ajuda geral de cada módulo**

Para além deste sistema de menus geral, é proporcionado ao utilizador um outro tipo de menus mais básico, interactivo, construído desta vez à custa de um utilitário do próprio ambiente de programação LabVIEW. Este sistema de menus, que se designou por *Sistema de Menus de Execução dos Módulos*, é accionado, em qualquer um dos painéis, através da sequência de comandos **Alt>Help>Show Help** (Fig. 6-6), e proporciona um conjunto de informações sobre os diversos *controlos* (variáveis de entrada) e *indicadores* (variáveis de saída) à medida que o dispositivo apontador ("rato") desliza sobre o painel.



**Fig. 6-6 - Chamada do menu de execução dos módulos**

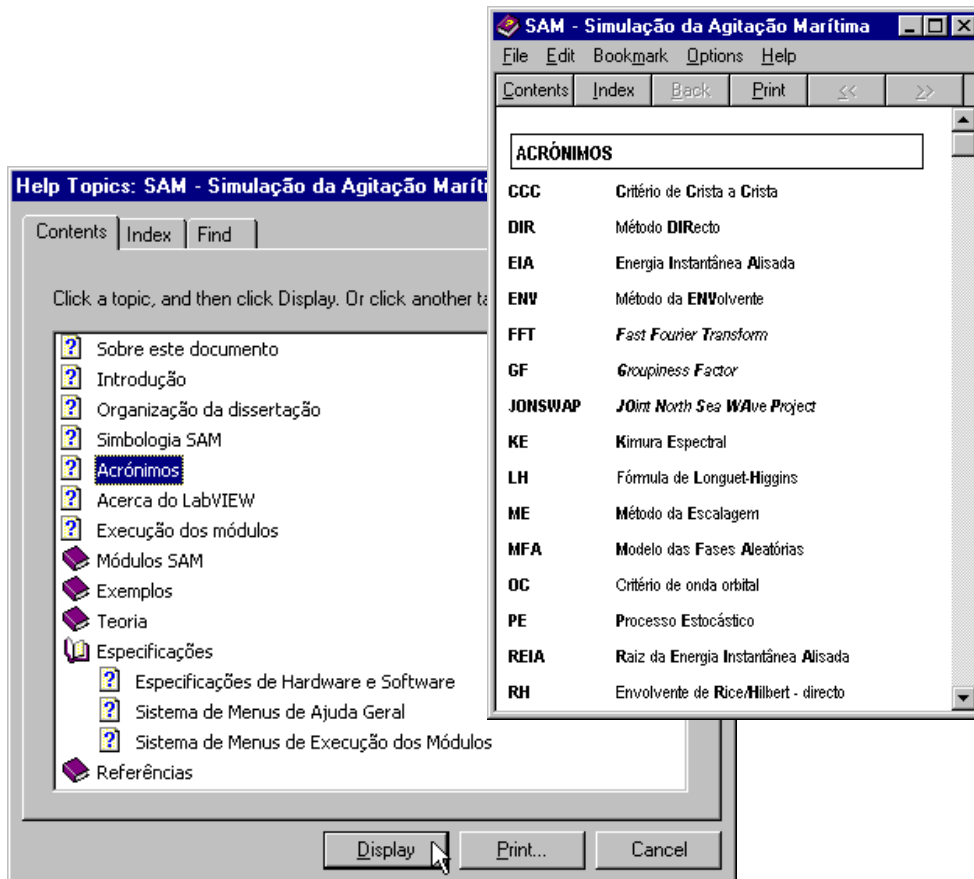


Uma descrição sumária do sistema de menus de execução dos módulos, acima referido, pode ser consultada em 6.3.3.

### 6.3.2 SISTEMA DE MENUS DE AJUDA GERAL

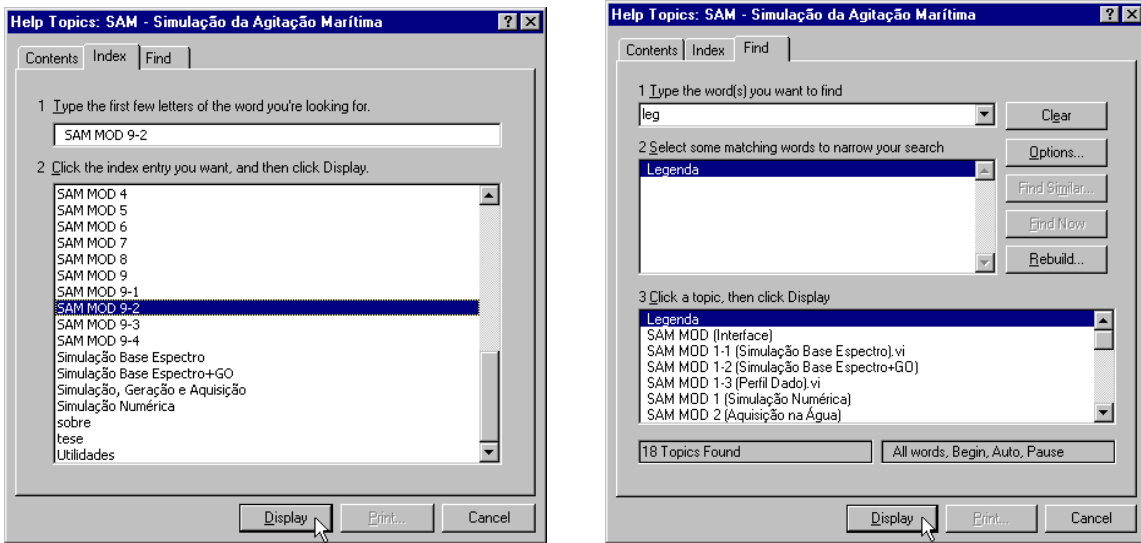
Como foi referido atrás, o menu de ajuda geral é constituído por um livro de ajuda (*Help*), designado "SAM.HLP". Este livro contém, fundamentalmente, a descrição dos métodos, variáveis, valores de omissão, etc., respeitante aos diversos módulos, ou seja, basicamente, o conteúdo das Secções 6.5.2 a 6.5.11 deste capítulo.

Para aceder a estes menus, deverá simplesmente fazer-se **Help>Online Help** na barra superior de menus em qualquer dos módulos, como se mostra na Fig. 6-5. Se, após este comando, se seleccionar a opção "Contents", ou conteúdo, surgirá uma janela de diálogo idêntica à da Fig. 6-7 que permite a consulta do livro SAM.HLP.



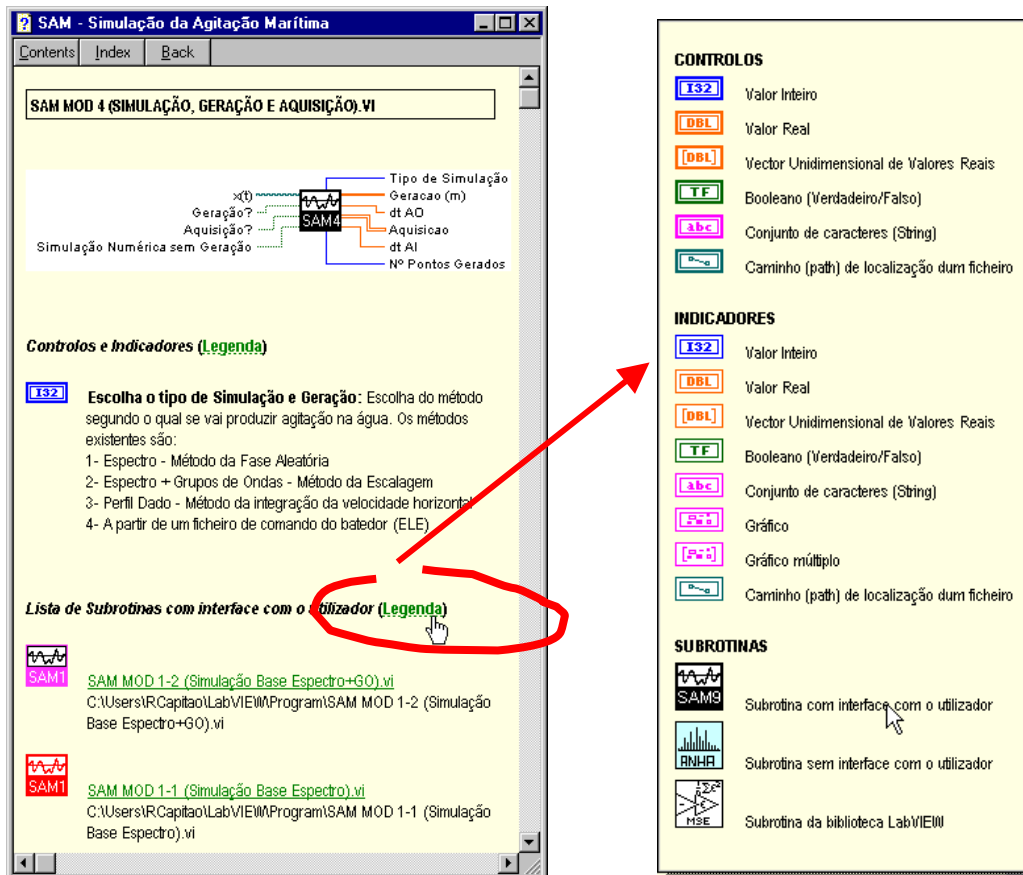
**Fig. 6-7 - Menu de ajuda geral do pacote SAM**

Consoante o módulo em que é chamado o referido menu, assim surgirá o livro de ajuda respectivo. É igualmente possível utilizarem-se palavras-chave (*keywords*) para seleccionar um determinado capítulo do livro de ajuda ou executar pesquisas (Fig. 6-8).



**Fig. 6-8** - Menus de ajuda geral através de indexação (*index*) ou de palavra-chave (*keyword*)

Como exemplo do conteúdo de uma destas ajudas, mostra-se na Fig. 6-9 o tópico referente ao módulo SAM MOD 4 (Simulação, Geração e Aquisição) e a ligação dinâmica deste à legenda desse módulo.



**Fig. 6-9** - Exemplo de conteúdo de um tópico do menu com *hiperligação* a sub-tópico

Repare-se que no topo da figura do lado esquerdo é apresentado, para o módulo em questão, um ícone onde se indicam as entradas (controlos) e saídas (indicadores) deste módulo. As indicações de cor verde, tais como "Legenda", representam ligações dinâmicas, ou *hiperligações*, para outros tópicos do sistema de menus SAM.

### 6.3.3 SISTEMA DE MENUS DE EXECUÇÃO DOS MÓDULOS

Estes menus actuam interactivamente com o utilizador e funcionam na forma de "Help Tips", contribuindo, assim, como ajuda adicional na descrição dos diversos controlos e indicadores presentes nos painéis frontais de cada aplicação. Como já se referiu atrás, o seu accionamento é efectuado, em qualquer dos painéis, através da sequência **Alt>Help>Show Help** (Fig. 6-6).

Depois de accionado, este menu de ajuda passa a ser sensível aos movimentos do rato (*mouse sensitive movement*) como ilustra a Fig. 6-10.



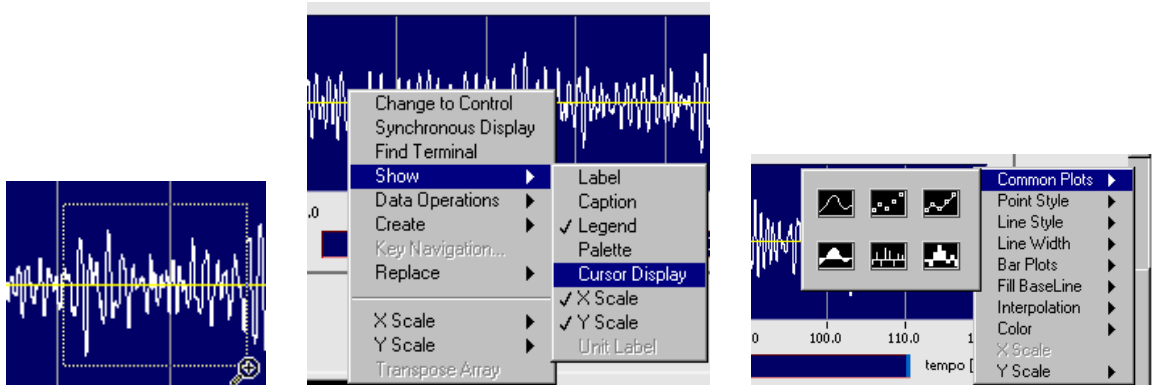
**Fig. 6-10 - Menu de ajuda de execução de um painel**

Aqui pode ver-se que o menu de ajuda relativo ao indicador "fp", frequência de pico, foi accionado ao passar-se o apontador ("mão") sobre aquele indicador.

## 6.4 FERRAMENTAS DE VISUALIZAÇÃO DE GRÁFICOS

O ambiente LabVIEW possibilita a utilização de diversas ferramentas de visualização de gráficos produzidos em G, nomeadamente funções de ampliação e redução num ou dois sentidos de uma porção do gráfico seleccionada pelo utilizador, a possibilidade de incluir cursores com capacidade de indicação de coordenadas rectangulares, a mudança de parâmetros gráficos, tais como

cor, espessura de traço, escala, graduação de eixos, *zoom*, etc.. Este tipo de funcionalidades será mais facilmente apreendido ao manusear o pacote **SAM**. No entanto, na Fig. 6-11 dão-se alguns exemplos do que se acabou de descrever.



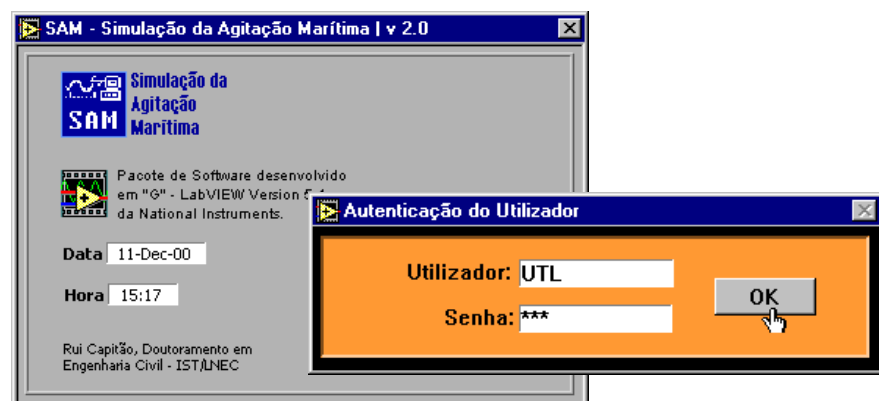
**Fig. 6-11 - Várias ferramentas de visualização de gráficos do LabVIEW (aplicação de *zoom*, inclusão de cursor e características das curvas)**

Estas funcionalidades são accionadas pela utilização do botão direito do "rato".

## 6.5 DESCRIÇÃO DOS MÓDULOS

### 6.5.1 AUTENTICAÇÃO DO UTILIZADOR

Ao executar-se o programa **SAM1.EXE**, a versão completa do pacote, e antes de qualquer utilização dos módulos mencionados, surge o primeiro painel do pacote, ilustrado na Fig. 6-12, onde se procede à identificação do utilizador do pacote **SAM**. Trata-se, assim, da porta de acesso ao sistema de 9 módulos já referido. A gestão da segurança dos pares "Utilizador/Senha" será sempre efectuada através de adequada programação em G.

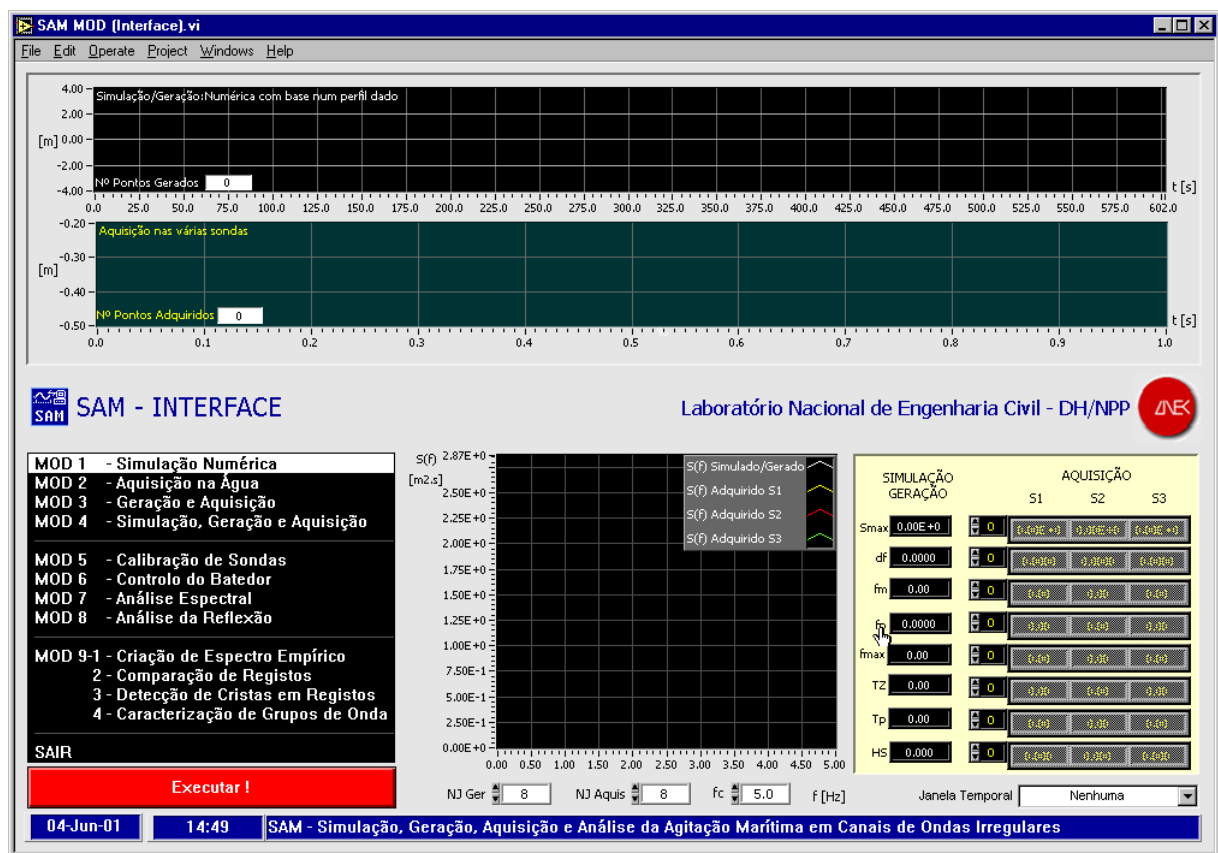


**Fig. 6-12 - Autenticação do utilizador do pacote de *software* SAM**

Para prosseguir a execução do pacote **SAM** incluído no CD que acompanha esta dissertação deverá-se introduzir o seguinte par "Utilizador/Senha": UTL/SAM. Notar que este módulo de autenticação não aparece na versão reduzida do pacote de software **SAM** (versão SAM2 . EXE).

### 6.5.2 MÓDULO DE INTERFACE

Este é o módulo principal do pacote **SAM**, o qual permite a simulação numérica e a simulação física, assim como a aquisição dos dados que são recolhidos pelas sondas. Após a aquisição, este módulo permite também a análise da reflexão e o cálculo de parâmetros espectrais e de grupos de ondas. O aspecto inicial do painel deste módulo é o que se mostra na Fig. 6-13.



**Fig. 6-13 - Aspecto inicial do painel-janela do software SAM MOD (Interface)**

Já a Fig. 6-14 mostra um painel-janela (painel de interface com o utilizador) típico de uma execução com este módulo.

O utilizador, neste painel, pode optar pela simulação isolada de sinais, pela geração e aquisição isoladas de sinais, pela utilização de várias utilidades de análise e processamento de sinais digitais ou, simplesmente, pela utilização de todas estas funcionalidades de uma forma consecutiva, na seguinte ordem natural: simulação, geração, aquisição, análise e processamento de sinais.

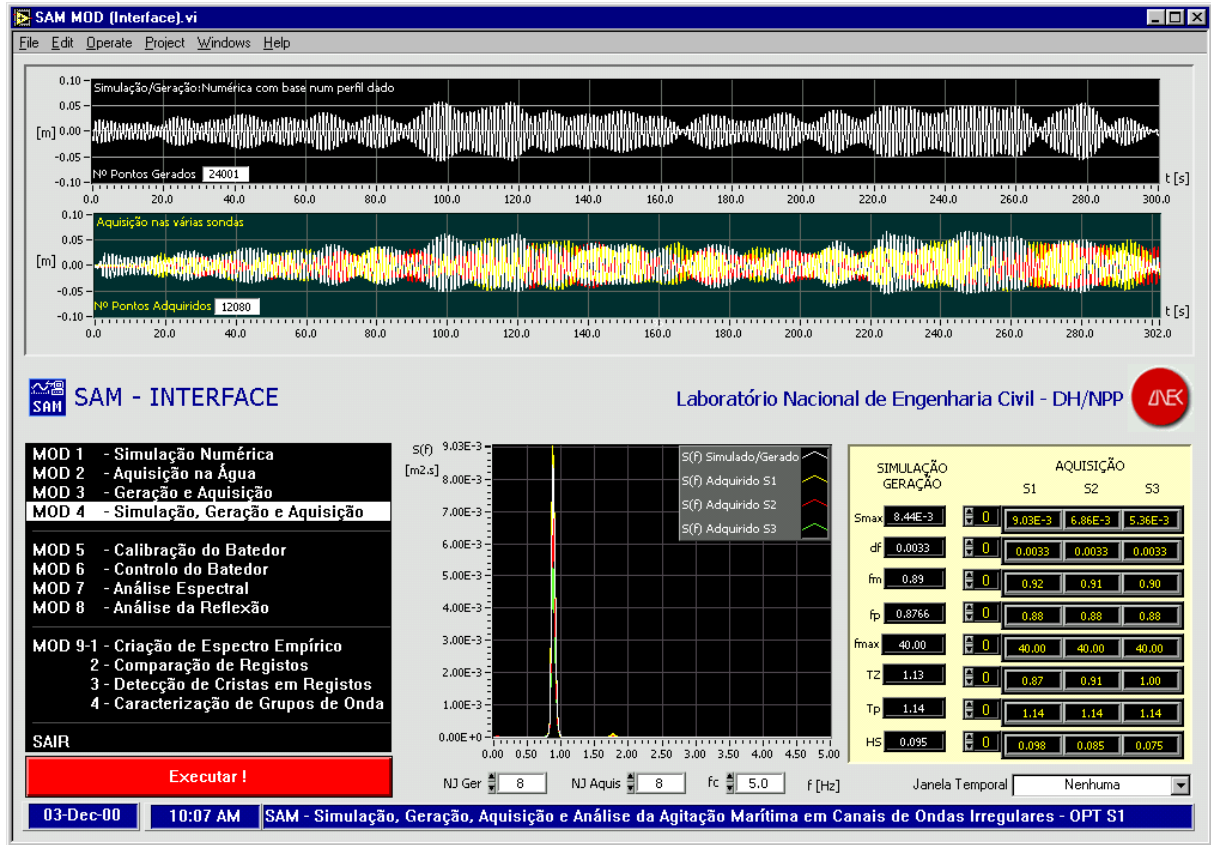




Fig. 6-14 - Exemplo de um painel-janela típico do software SAM MOD (Interface)

As opções referidas são ilustradas na Fig. 6-15, para as duas possibilidades de instalação, relativas às versões executáveis SAM1.exe (à esquerda da figura) e SAM2.exe (à direita da figura), respectivamente.



Fig. 6-15 - Aspecto das opções de execução do módulo SAM MOD (Interface) para as duas possibilidades de instalação (SAM1.exe e SAM2.exe, respectivamente)

Para executar qualquer um dos módulos permitidos, deve premir-se a tecla encarnada. Notar que, à excepção do presente módulo **SAM MOD (Interface)**, todos os módulos aqui descritos deverão ser executados, após confirmação dos dados inscritos nos diversos controlos, através da utilização da *tecla de execução* , localizada no canto superior esquerdo de cada painel (ver, por exemplo, Fig. 6-16).

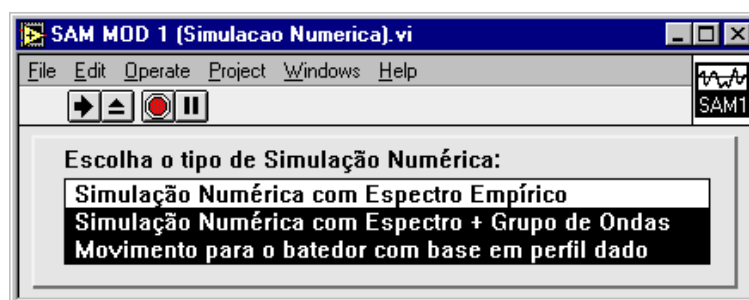
Por outro lado, após execução de cada módulo, para voltar ao painel de origem (quase sempre o módulo principal **SAM MOD (Interface)**) deverá utilizar-se a *tecla de retorno* , situada à direita da já referida tecla de execução.

Repare-se que no painel do presente módulo **SAM MOD (Interface)** são apresentados três gráficos diferentes. Os dois de cima apresentam, após simulação, geração e aquisição, os sinais gerados e adquiridos, e o de baixo representa, após análise espectral dos sinais gerados e adquiridos, os espectros daqueles sinais. Depois do processamento, são igualmente apresentados vários parâmetros obtidos a partir da informação mostrada em cada um daqueles gráficos.

A partir deste painel de interface, pode executar-se qualquer um dos módulos do pacote **SAM**.

### 6.5.3 MÓDULO 1 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O primeiro módulo do pacote **SAM** permite a simulação numérica simples de registos de elevações da superfície da água, com base em diversos métodos. Neste módulo, faz-se, isoladamente, a simulação numérica de sinais de acordo com a especificação, quer de um certo espectro, de acordo com a teoria da Secção 4.2, quer de um espectro e de uma função envolvente característica de agrupamento de ondas, com base na teoria da Secção 4.3. Possibilita-se também a determinação da função de movimento do batedor por forma a obter um dado perfil de onda na água, como se explica na Secção 5.7. São estas as três opções que figuram no painel da Fig. 6-16.



**Fig. 6-16 - Aspecto inicial do painel SAM MOD 1 (Simulação Numérica)**

Pode, portanto, optar-se pela simulação numérica com base unicamente num espectro (empírico ou não), num espectro com determinada característica de agrupamento de ondas (dada pela sua envolvente) ou, finalmente, num perfil de onda pré-especificado. Consoante a opção tomada, assim são chamados os sub-módulos correspondentes, descritos na próxima secção.

## 6.5.3.1 MÓDULO 1-1 — SIMULAÇÃO BASE ESPECTRO

Ao optar pela simulação numérica com base num espectro (ver teoria na Secção 4.2), há que seleccionar o tamanho do registo pretendido, a frequência de digitalização, assim como as características do espectro empírico desejado.

Podem ser simulados registos de elevações de acordo com vários espectros empíricos, tais como os de JONSWAP, Pierson-Moskowitz Generalizado, Pierson-Moskowitz (ITTC), ou Bretschneider-Mitsuyasu (ver definição destes espectros empíricos no **Anexo 2 - Definição de Espectros Empíricos**). Evidentemente que, a qualquer altura, se poderá complementar o conjunto de espectros empíricos referidos com outros que se acharem convenientes para a resolução de um dado problema. Este módulo faz, internamente, uso do sub-módulo **SAM MOD 9-1 (Criação de Espectro Empírico)**, descrito em 6.5.11.

Neste tipo de simulação, importa escolher vários parâmetros, dentre os quais se salientam:

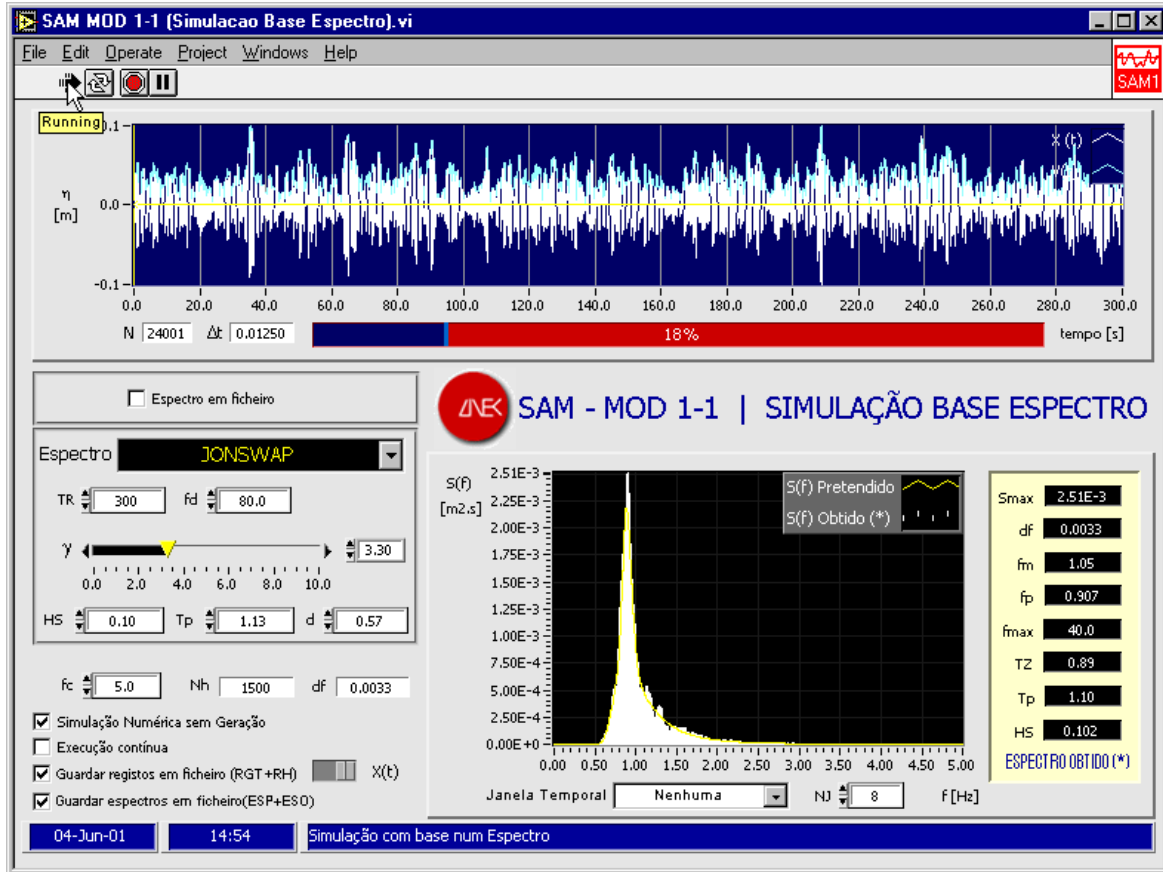
- **A duração do sinal simulado**,  $T_R$  - Geralmente, o sinal simulado não necessita de ser muito longo (são habituais durações de 300 a 600 s).
- **A frequência de digitalização da simulação**,  $f_d$ , inverso do intervalo entre observações ( $\Delta t$ ), em Hertz ou ciclos/segundo.
- **A profundidade da água** no canal,  $d$ , em  $m$ .
- **O tipo de espectro empírico** a utilizar para a simulação numérica do sinal (ver **Anexo 2 - Definição de Espectros Empíricos**): JONSWAP-Goda (**JW**), Eq. (A-20), Pierson-Moskowitz GENeralizado (**PMG**), Eq. (A-19), Pierson-Moskowitz ITTC (**PMI**), Eq. (A-18), ou Ruído Branco (**RB**), Eq. (5-18). Consoante o tipo de espectro considerado, devem especificar-se parâmetros tais como:
  - **A altura significativa**,  $H_S$ , em  $m$ , para todos os tipos de espectros acima mencionados.
  - **O período de pico do espectro**,  $T_p$ , em  $s$ , para os espectros do tipo **JW** e **PMI**.
  - **O parâmetro de largura espectral**,  $\gamma$ , para o espectro do tipo **JW**.

A Fig. 6-17 mostra um painel-janela típico deste módulo, em fase de execução de uma simulação numérica de um registo de 300 s de duração ( $T_R$ ), de acordo com um espectro empírico JONSWAP com  $T_p = 1.13$  s,  $H_S = 0.10$  m e  $\gamma = 3.3$ , para  $f_d = 80$  Hz.

Vejam-se, neste exemplo, o sinal simulado, mostrado a branco na parte superior do painel, e os espectros pretendido e obtido, ilustrados respectivamente a amarelo a branco, no gráfico do canto inferior direito do painel. O quadro com fundo amarelo à direita da Fig. 6-17 contém parâmetros importantes da caracterização espectral do sinal simulado.

A análise espectral efectuada neste módulo possibilita a utilização de diversas janelas temporais e o alisamento por médias móveis do espectro do sinal simulado. Este tipo de tratamento espectral do sinal é, aliás, comum a todos os outros módulos que compreendam análise espectral de registos.





**Fig. 6-17 - Painel-janela típico do software SAM MOD 1-1 (Simulação Base Espectro)**

### 6.5.3.2 MÓDULO 1-2 – SIMULAÇÃO BASE ESPECTRO + GRUPOS DE ONDA

Se se optar pela simulação numérica com base num espectro e numa certa envolvente (Secção 4.3), há que indicar os ficheiros que contêm o espectro e a envolvente pretendidos, seleccionar a frequência de digitalização, assim como as características da envolvente e o valor de  $E[J]$ , que se pretendem obter no registo simulado. A Fig. 6-18 ilustra um exemplo de aplicação deste módulo.

Este módulo fornece um registo com as envolventes desejada e obtida<sup>22</sup>, assim como diversos parâmetros característicos dos sinais utilizados.

Para utilização dos métodos presentes neste módulo de simulação numérica, o método da escalagem e o método iterativo REIA, é necessário fornecer o seguinte conjunto de dados:

- **Nome do ficheiro que contém as frequências e ordenadas do espectro dados.**  
Note-se que este ficheiro deverá conter 2 colunas,  $f$  e  $S(f)$ , separadas por "tabs";

<sup>22</sup> É este registo numérico, produzido de acordo com os métodos da Secção 4.3, pág. 88, que servirá como entrada no método de geração de perfis de elevação da superfície da água, descrito na Secção 5.7, tendo em vista a simulação física de registos com grupos de ondas referida na Secção 5.8.

- **Nome do ficheiro que contém a envolvente dada,  $V(t)$ ;**
- **Nome do ficheiro que conterá a envolvente do novo sinal iterado,  $V^*(t)$ ;**
- **Tipo de envolvente de grupos de ondas: REIA:** Simulação de um sinal dados o espectro  $S(f)$  e a envolvente REIA, **RHA:** Simulação de um sinal dados o espectro  $S(f)$  e a envolvente RH alisada (através da TH), **REG:** Simulação de um sinal dados o espectro  $S(f)$  e um registo dado<sup>23</sup>;
- **Frequência de digitalização,  $f_d$ ,** inverso do intervalo entre observações ( $f_d = 1/\Delta t$ ), em Hz. Deve satisfazer-se a seguinte condição:  $f_d > 2*f_{max}$ , sendo  $f_{max}$  a frequência máxima presente no sinal;
- **Nível de grupo de ondas,  $v$ ,** expresso em partes de altura significativa;
- **Factor de escalagem,  $k_{FG}$ ,** Eq. (4-15), relação entre o valor de  $E[J]$  (ou  $E[D]$ ) pretendido e o valor de  $E[J]$  inicial;
- **Erro Máximo Admissível,  $Erro\ máx.$ ,** erro máximo admissível entre a envolvente efectivamente obtida em cada iteração e a envolvente inicial dada.

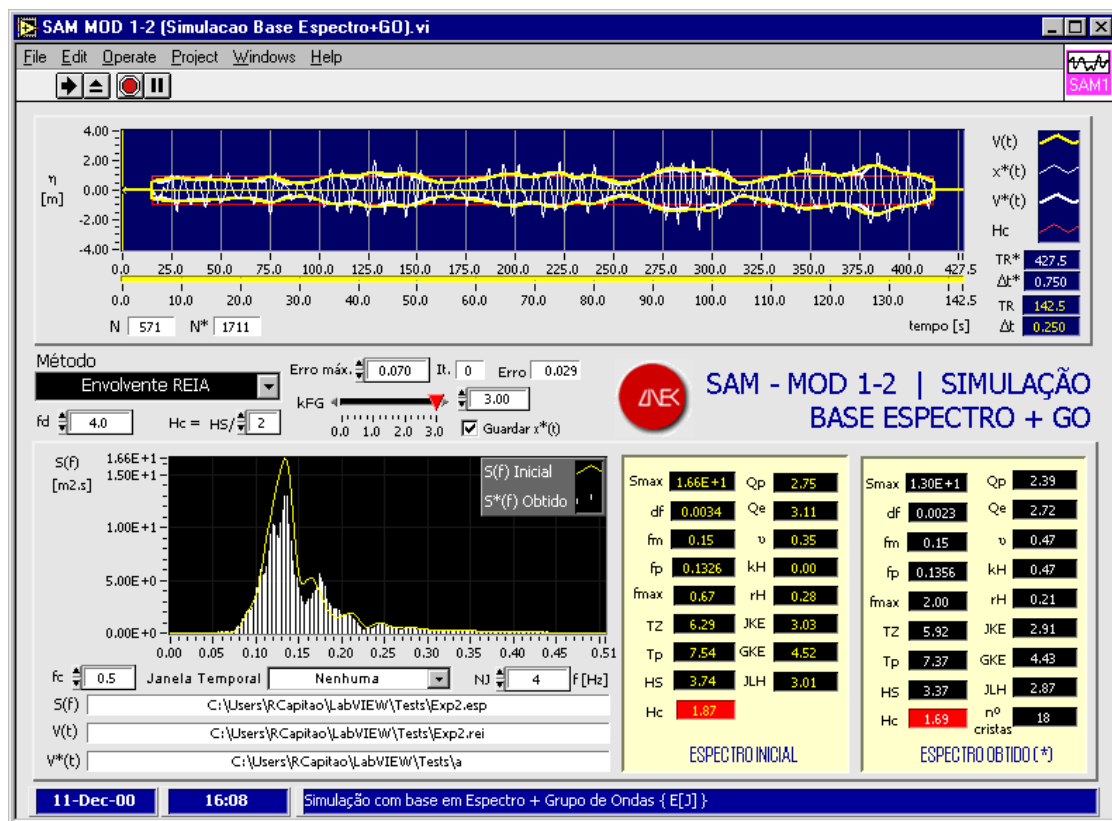


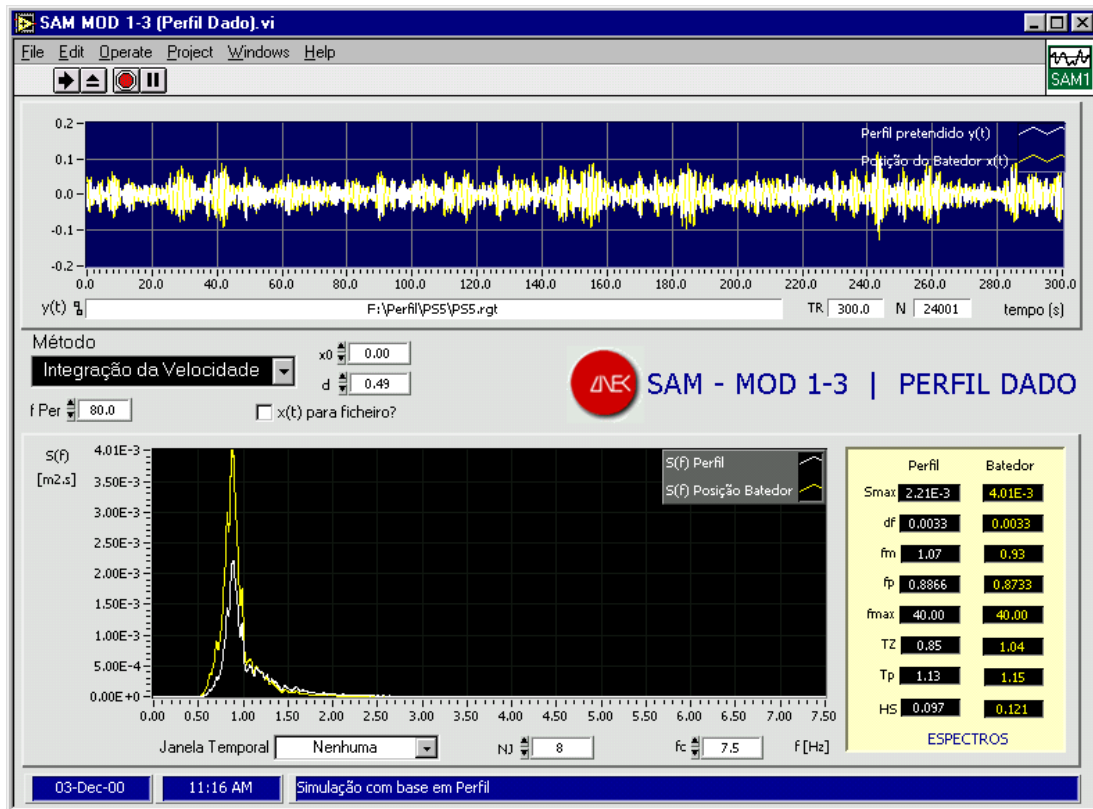
Fig. 6-18 - Aspecto inicial do painel SAM MOD 1-2 (Simulação Base Espectro+GO)

<sup>23</sup> O módulo SAM MOD 1-2 (Simulação Base Espectro+GO) não permite ainda esta possibilidade de simulação.

Neste exemplo ilustra-se a determinação de um registo,  $x^*(t)$ , com a envolvente REIA de um registo inicial dado,  $x(t)$ , e um factor de escalagem,  $k_{FG} = 3$ . Repare-se que a duração,  $T_R^*$ , do novo registo é tripla da duração,  $T_R$ , da envolvente inicial. Tal como no módulo **SAM MOD 1-1 (Simulação Base Espectro)**, mostram-se neste painel, na sua parte inferior, os espectros dos sinais inicial e obtido após a aplicação do método da escalagem. De igual forma, são apresentados para estes dois sinais os parâmetros espectrais mais representativos. Todos os tipos de sinais e envolventes incluídos nestes cálculos podem, evidentemente, ser guardados em ficheiros.

### 6.5.3.3 MÓDULO 1-3 – PERFIL DADO

Este módulo permite a utilização de um método de reprodução de perfis temporais (registos) de agitação num canal ou tanque (Secção 5.7). Apesar de neste módulo se encontrar já prevista a utilização de três métodos diferentes, só o método da integração da velocidade horizontal, tal como se descreveu em 5.7.1, está, presentemente, operacional. A Fig. 6-19 mostra um exemplo da utilização deste módulo.



**Fig. 6-19 - Painel-janela típico do software SAM MOD 1-3 (Perfil Dado)**

Na Fig. 6-19 é ilustrada a obtenção do sinal  $x(t)$ , movimento do batedor, por forma a obter-se na água o perfil pretendido,  $y(t)$ . Como se observa, o local onde se pretende obter o perfil representado no gráfico da parte superior do painel (a branco) é precisamente junto ao batedor, visto que  $x_0 = 0$ . Também neste painel são apresentados os parâmetros espectrais mais representativos dos tipos de sinais e envolventes incluídos nestes cálculos, os quais podem ser guardados em ficheiros.

Este módulo, se for usado isoladamente, fornece um ficheiro com o registo das posições do batedor necessárias para obter (em ensaios físicos) o perfil pretendido.

Salientam-se os seguintes parâmetros principais necessários à utilização deste módulo:

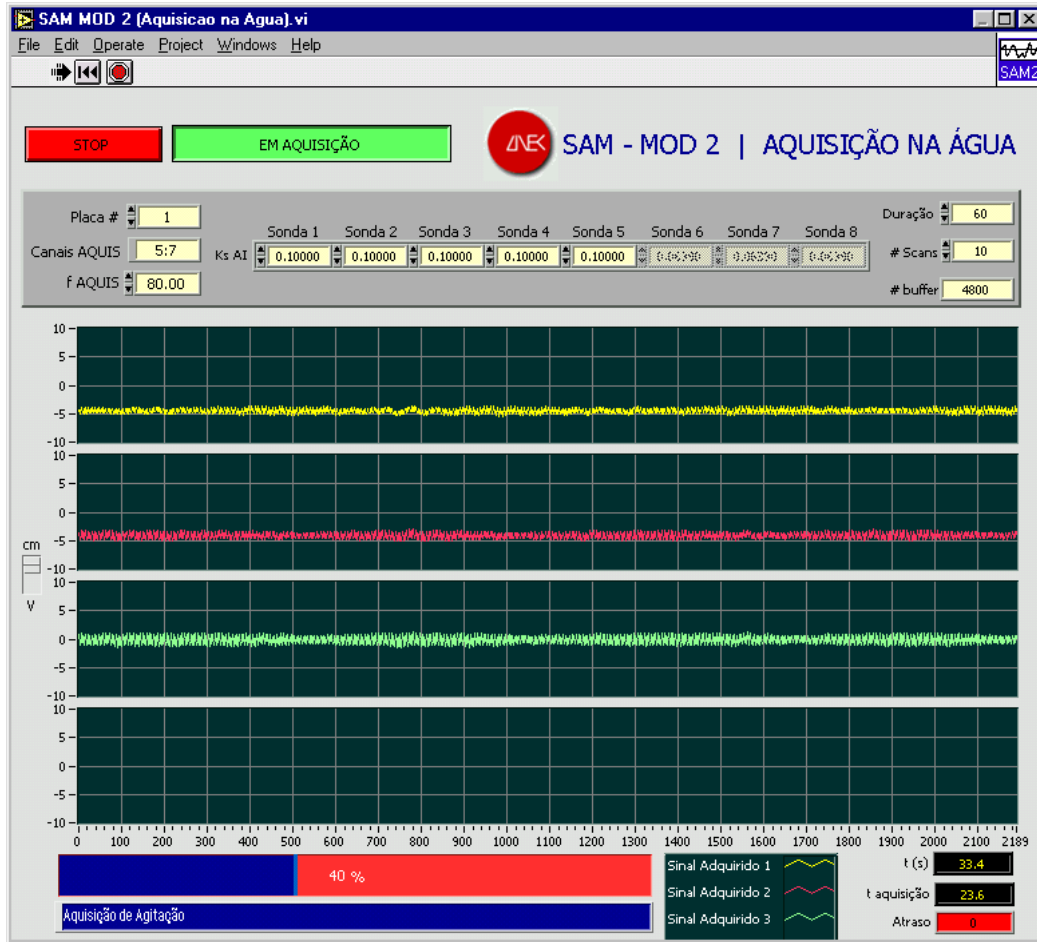
- **Seleção do método de simulação na água com base num perfil dado.** Presentemente, apenas o método da integração da velocidade horizontal está disponível, como se disse. No entanto, está previsto incluir, mais tarde, mais dois outros métodos: o método da teoria dos filtros (Secção 5.7.2) e o método da decomposição de Fourier (Secção 5.7.3);
- **Frequência de digitalização do perfil dado,**  $f_{per}$ . Caso o sinal a gerar tenha uma frequência de digitalização ( $f_{Ger}$ ) diferente da frequência de digitalização do perfil dado,  $f_{per}$ , será necessário utilizar uma rotina (sub-módulo) de interpolação/extrapolação.
- **Frequência de digitalização do sinal a gerar,**  $f_{Ger}$ , com base no perfil dado.
- **Distância do batedor de ondas ao ponto onde se pretende obter o perfil dado da superfície da água,**  $x_0$ , em metros. No caso de  $x_0 = 0$ , considera-se que o deslocamento do perfil é rígido. Se  $x_0 > 0$ , podem calcular-se, de acordo com a Eq. (5-111), Secção 5.7.1.2, as modificações nas fases das harmónicas, considerando que a transformação do perfil desde o batedor até ao local da sonda é linear.
- **A profundidade da água no canal,**  $d$ , em  $m$ .

#### 6.5.4 MÓDULO 2 – AQUISIÇÃO NA ÁGUA

O módulo 2 considera a aquisição, isolada, de sinais em até 8 canais (para a placa de aquisição utilizada), referentes a igual número de sondas. Este módulo é chamado como subrotina nos módulos SAM MOD 3 (Geração e Aquisição) e SAM MOD 4 (Simulação, Geração e Aquisição), descritos a seguir. O aspecto do painel deste módulo é ilustrado na Fig. 6-20.

É necessário fornecer o seguinte:

- **A identificação da placa de aquisição e geração.** Identificação numérica, geralmente designado por 1, se só existir uma placa DAQ no computador.
- **A identificação do canal ou canais de entrada, de aquisição.** Em testes (ciclo fechado), costuma ser designado por 7.
- **A duração da aquisição,**  $T_R$  - Quando não é indicado qualquer valor para a duração, a aquisição termina quando se pressiona a tecla "STOP".
- **A constante característica de cada sonda,**  $K_s$  - Estas são dependentes do registo. Se o registo vier do canal, a constante característica da sonda é obtida no processo de calibração. Para efeitos de utilização no pacote SAM, esta constante (que, na verdade, varia de dia para dia, em função, nomeadamente, da temperatura da água no canal) deverá ser expressa em *metro/Volt*.



**Fig. 6-20 - Aspecto inicial do painel SAM MOD 2 (Aquisição na Água)**

- **A frequência de aquisição,  $f_a = 1/\Delta t$**  - Esta terá que ser superior ao dobro da frequência máxima,  $f_{max}$ , existente no sinal:

$$f_a > 2f_{max} \quad (6-1)$$

A frequência máxima,  $f_{max}$ , é a frequência do sinal acima da qual a amplitude (ou o espectro) é praticamente nula.

Note-se que, dado um sinal,  $x(t)$ , de duração finita,  $T_R$ , definido por  $N$  pontos igualmente espaçados de  $\Delta t$ ,  $T_R$ ,  $N$  e  $\Delta t$  estão relacionados pela expressão:  $T_R = N \cdot \Delta t$ .

Para reconstituir um sinal de forma exacta, deverá ser escolhido um intervalo de aquisição  $\Delta t$  tal que:

$$\Delta t < 1/(2 \cdot f_{max}) \quad (6-2)$$

Portanto, ao passar-se do domínio contínuo (analógico) para o domínio discreto (digital), através de uma frequência de amostragem  $f_a = 1/\Delta t$ , há que garantir aquela relação, que traduz o mesmo que a Eq. (6-1).

Nos ensaios correntes efectuados no LNEC, é habitual considerar uma frequência de aquisição de 15 Hz, bastante superior ao dobro da frequência máxima típica em ensaios em canal ( $2 \times 2.0 = 4$  Hz). Deste modo, há a garantia de que, para os sinais utilizados, não surge o problema da sobreposição (*aliasing*).

### 6.5.5 MÓDULO 3 – GERAÇÃO E AQUISIÇÃO

O módulo SAM MOD 3 (Geração e Aquisição) permite, simultaneamente, gerar sinais eléctricos para alimentar a servo-válvula que comanda o pistão do batedor e adquirir os dados que são recolhidos pelas sondas. A Fig. 6-21 mostra um painel-janela típico deste módulo.



Fig. 6-21 - Painel-janela típico do software SAM MOD 3 (Geração e Aquisição)

A geração de ondas no canal de ondas irregulares e a posterior aquisição de dados são efectuadas através da utilização do módulo SAM MOD 3 (Geração e Aquisição) do pacote de software SAM. Nesta fase,

é gerada agitação com base nos sinais anteriormente simulados por via numérica, através da utilização da placa de geração e aquisição de dados (DAQ) inserida no computador. Na aquisição, os sinais analógicos produzidos nas sondas resistivas instaladas no canal são convertidos em sinais digitais, através de um conversor Analógico/Digital (A/D), passíveis de serem interpretados pelo computador. Neste módulo, para além dos parâmetros já mencionados na secção anterior, há ainda que seleccionar:

- **A identificação numérica do canal ou canais de saída, de geração.** Normalmente, toma a designação  $\{0, 1\}$  para identificar os canais  $0$  e  $1$ ;
- **A duração do sinal a gerar** - Trata-se de decidir se se utilizará a duração total do registo simulado, uma parte, ou múltiplos deste. Uma vez que o sinal simulado não é, em geral, muito longo ( $120$  a  $180$  s, à escala do canal), quando se pretende gerar um sinal mais longo, opta-se pela repetição do sinal simulado até perfazer a duração total pretendida. Há que tomar, no entanto, o cuidado de garantir que a “colagem” dos múltiplos sinais simulados é feita de forma suave, para que eventuais transições súbitas do sinal a gerar não produzam movimentos bruscos no batedor. Para este efeito, existe, no módulo de geração utilizado, uma rotina (**Aparar Sinal.vi**) que tem como finalidade alisar, se necessário, as extremidades dos sinais a colar.
- **A frequência de geração,  $f_{Ger}$**  - Frequência de actualização do ficheiro de comando do batedor, isto é, o número de ordens dadas ao batedor de ondas por segundo. Verifica-se, da experiência laboratorial que, para um gerador do tipo pistão, há a necessidade de utilizar um intervalo de digitalização de pelo menos  $50$  ms (frequência de  $20$  Hz) para que o movimento do batedor seja suficientemente suave, do ponto de vista operacional. Nos ensaios correntes efectuados no LNEC, é habitual considerar uma frequência de geração de  $80$  Hz, claramente superior ao valor mínimo referido.

#### 6.5.6 MÓDULO 4 – SIMULAÇÃO, GERAÇÃO E AQUISIÇÃO

Este módulo, que tem o mesmo aspecto do módulo inicial de interface, contempla todos os anteriores módulos e permite, como o seu nome indica, a simulação numérica de sinais, a sua geração no canal de ondas irregulares, a aquisição de sinais no canal e, finalmente, respectivos processamento e análise. Quando não é necessária qualquer simulação numérica, pode utilizar-se unicamente um ficheiro contendo as posições (previamente conhecidas) do comando do batedor, expressas em  $V$  (*Volt*), para a geração.

Não existe nenhum painel isolado contendo o processamento dos dados gerados e adquiridos. Os resultados do processamento de dados podem ser, no entanto, consultados, sequencialmente, nos diversos painéis, alguns dos quais já descritos e outros que se expõem a seguir.

Como exemplo, o Módulo 4 (que, internamente chama os Módulos 1, 2 e 3), apresenta o aspecto da Fig. 6-22. No canto inferior direito deste painel, podem ver-se alguns resultados do processamento relativos ao sinal gerado e aos sinais adquiridos com três sondas (designadas S1, S2 e S3).

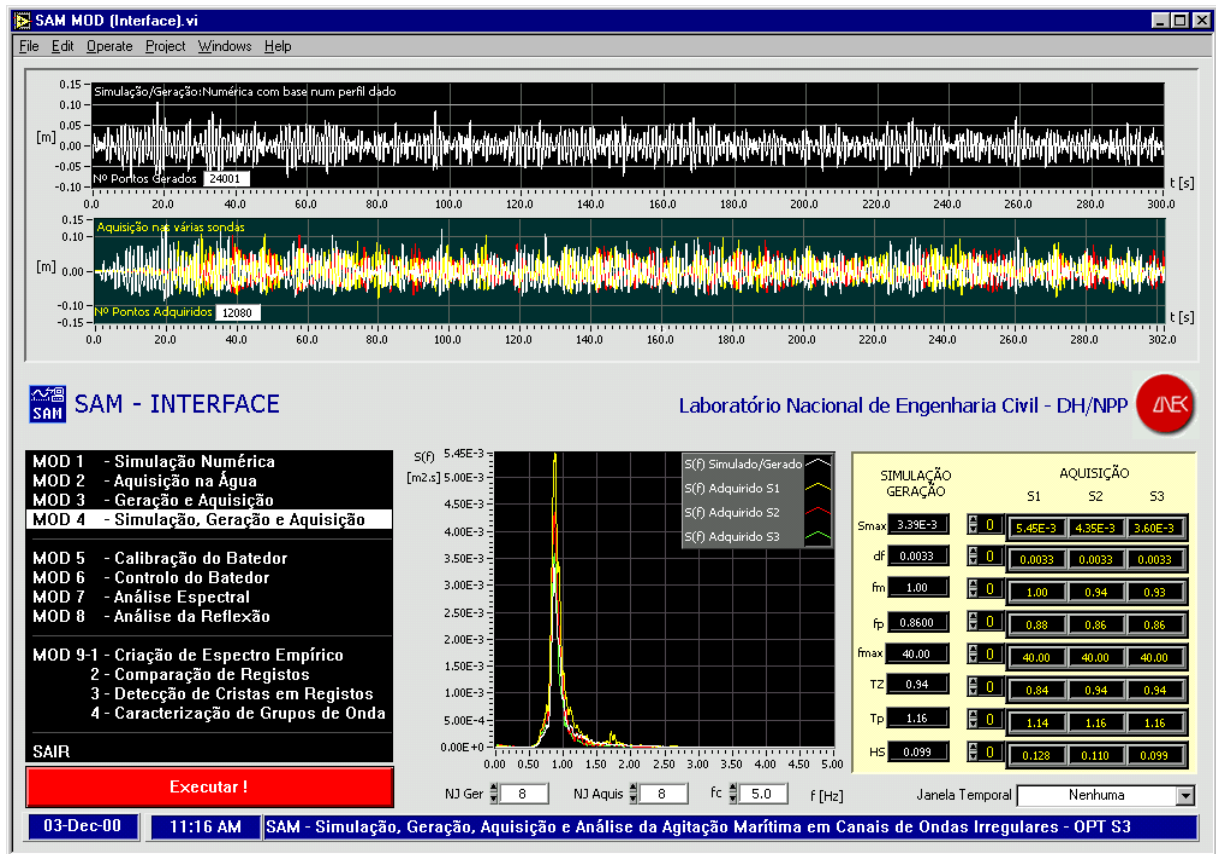


Fig. 6-22 - Aspecto do painel do SAM MOD 4 (Simulação, Geração e Aquisição)

Realizada a aquisição sob a forma digital, há que tratar e processar essa informação. Nesta fase, fazem-se os seguintes tipos de cálculos: (a) Caracterização geral das ondas e (b) Caracterização dos grupos de ondas, de acordo com a teoria apresentada nos Capítulos 2 e 3 respectivamente.

Os resultados do tratamento são apresentados para cada caso ou, quando efectuados para um conjunto de casos, sob a forma tabular. No exemplo da Fig. 6-22, pode ver-se, no gráfico de cima, o sinal simulado e gerado no canal (pretendido), a branco. No gráfico imediatamente abaixo, observam-se os sinais correspondentes obtidos no canal: a amarelo, a encarnado e a verde, respectivamente para as sondas S1, S2 e S3. Em baixo, a meio, mostram-se os espectros dos sinais acima referidos. Também em baixo, no canto inferior direito, surge o habitual quadro com as características espectrais dos quatro sinais envolvidos neste cálculo.

Notar, porém, que a execução deste e de qualquer um dos outros módulos não dispensa um exame cuidadoso dos resultados obtidos.

### 6.5.7 MÓDULO 5 – CALIBRAÇÃO DE SONDAS

Este módulo permite calibrar as sondas mediante utilização do *hardware* referente ao batedor de ondas. A Fig. 6-23 mostra um aspecto dessa calibração.



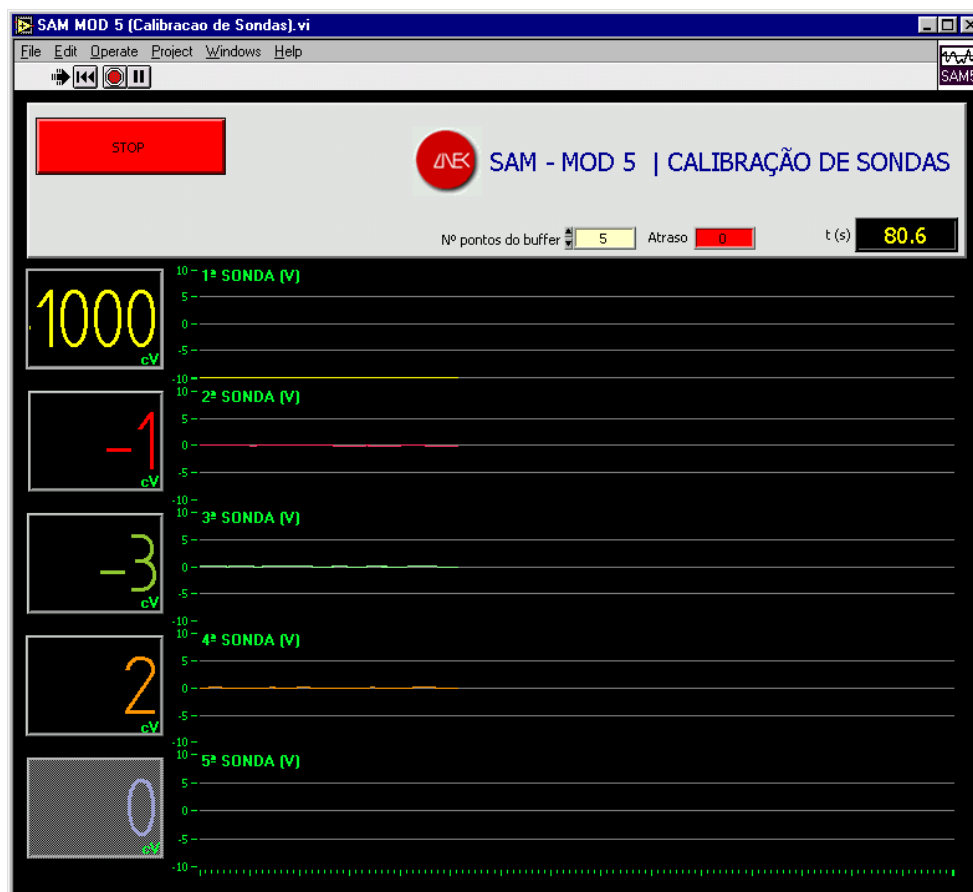


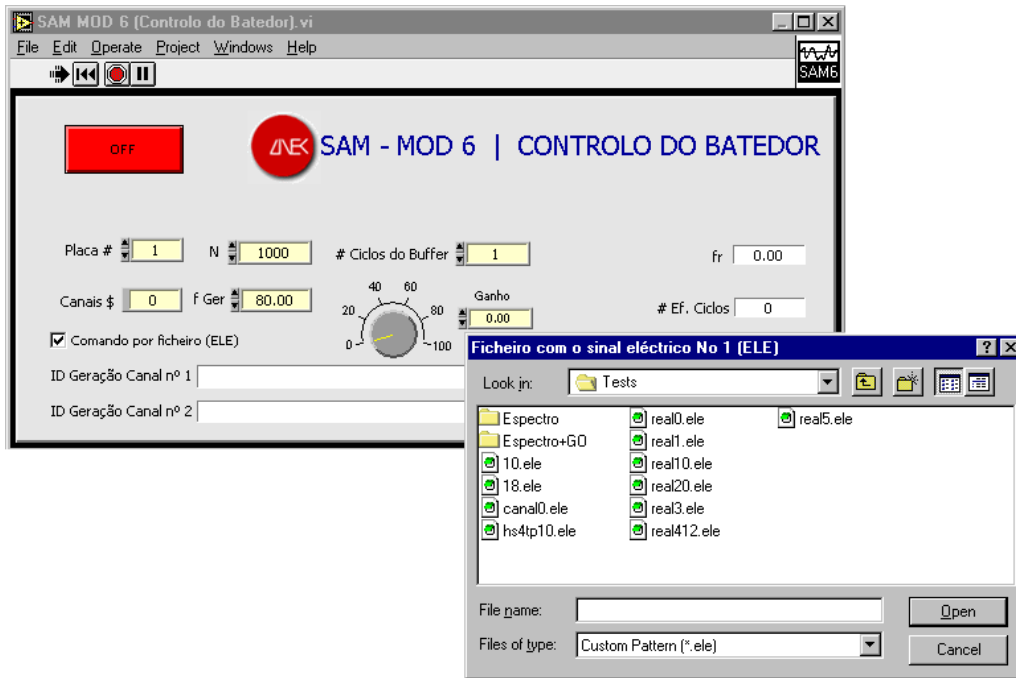
Fig. 6-23 - Aspecto do painel SAM MOD 5 (Calibração de Sondas)

Neste painel mostra-se um aspecto do processo de calibração em 4 sondas, com os valores dados em *centivolts* (cV), numa situação de repouso da superfície livre do canal. Verifica-se, neste exemplo, que a primeira sonda não está correctamente posicionada verticalmente, visto que produz um sinal de valor bastante distante de 0. Há que fazer essa correcção, o chamado *acerto do zero*, via *hardware*. A razão do grande tamanho dos algarismos dos indicadores da tensão eléctrica nas diversas sondas é a de possibilitar a leitura do painel à distância onde se encontra o *controlador de acerto do zero*, relativamente ao computador.

### 6.5.8 MÓDULO 6 – CONTROLO DO BATEDOR

Este módulo permite, isoladamente, controlar a geração de ondas no canal ou tanque, através de um ou dois diferentes canais de geração (o máximo que a actual placa de geração de sinais permite), ou seja, possibilita o controlo simultâneo de um máximo de dois batedores. Estes sinais de geração são fornecidos à placa através da indicação de dois ficheiros de comando de batedor (geralmente de extensão .ELE), um para cada canal.

A Fig. 6-24 mostra um exemplo da execução do módulo referido numa fase inicial, em que é pedido o nome do ficheiro de comando do batedor.



**Fig. 6-24 - Aspecto do painel SAM MOD 6 (Controlo do Batedor)**

Adicionalmente, o controlo da geração pode ser ajustado, via *hardware*, no painel de controlo do actuador do batedor. Na Fig. 6-25 pode ver-se um pormenor deste painel de controlo.

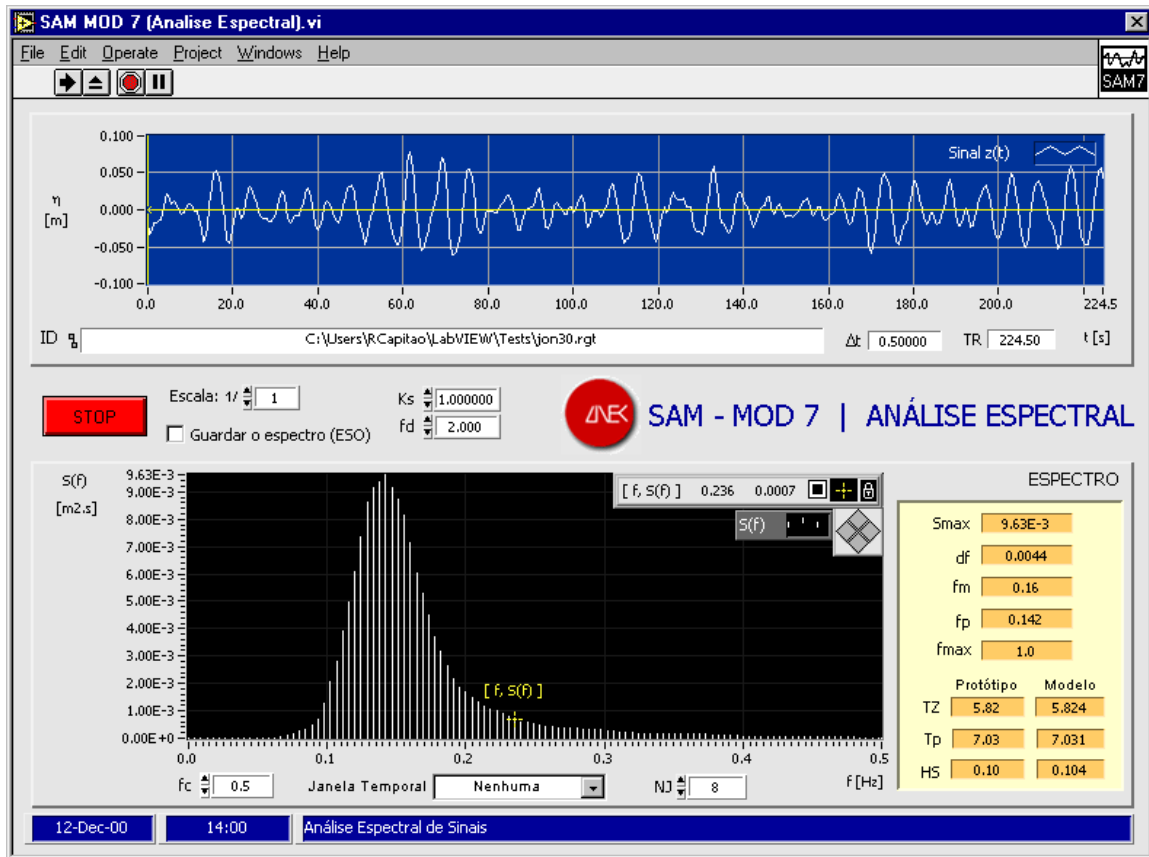


**Fig. 6-25 - Painel de controlo do actuador do batedor**

### 6.5.9 MÓDULO 7 – ANÁLISE ESPECTRAL

O módulo de análise espectral permite, isoladamente, analisar os espectros de sinais vindos de um ficheiro ou de uma qualquer rotina. Claro que este módulo, considerado isoladamente, está apto a analisar espectralmente quaisquer sinais temporais, independentemente da sua origem.

A Fig. 6-26 mostra um exemplo de aplicação deste módulo na análise de um registo temporal simulado, cujo espectro, como se vê, tem a forma típica de um espectro JONSWAP.



**Fig. 6-26 - Aspecto do painel SAM MOD 7 (Análise Espectral)**

Se o sinal de análise provier do canal de ondas irregulares, a uma dada escala, podem obter-se imediatamente as características espectrais na escala do protótipo, uma vez que este parâmetro pode ser incluído na análise (por omissão, a escala é 1:1). Neste exemplo, vê-se que é necessário indicar apenas a proveniência do sinal a analisar, as eventuais escala e constante característica de sonda,  $K_s$ , deste sinal, e a frequência a que foi digitalizado,  $f_d$ . Obtém-se, após análise espectral deste sinal, o respectivo espectro, com as possibilidades já referidas de mudar a janela temporal e o número de pontos de alisamento, e o habitual quadro com as características espectrais mais importantes do sinal considerado.

#### 6.5.10 MÓDULO 8 – ANÁLISE DA REFLEXÃO

O Módulo 8 possibilita a separação dos espectros incidente e reflectido, dentro de canais de ondas, através da utilização dos métodos já descritos no capítulo anterior. Este módulo corresponde, portanto, à aplicação dos métodos das 2 sondas e das  $M$  sondas para a separação de agitação incidente e reflectida, de acordo com o exposto na Secções 5.5.2.1 e 5.5.2.2, respectivamente.

A Fig. 6-27 mostra um painel-janela típico.

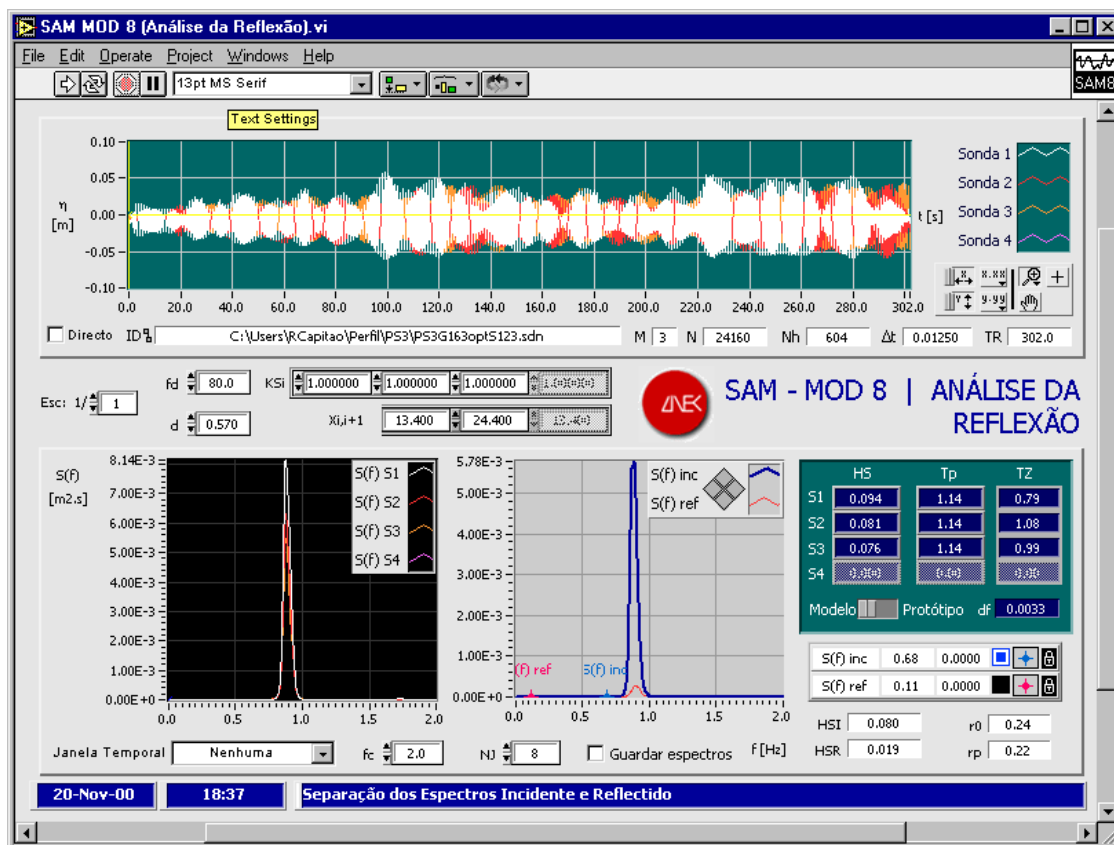


Fig. 6-27 - Aspecto do painel SAM MOD 8 (Análise da Reflexão)

Neste exemplo, pode ver-se o resultado da separação dos espectros incidente e reflectido, utilizando o método das  $M$  sondas (neste caso três, colocadas ao longo do canal de ondas irregulares). Após a separação da agitação incidente e reflectida, obtida por utilização deste módulo, seria desejável compensar o movimento do baterador por forma a evitar a indesejável reflexão dentro do canal. Este problema não está, porém, resolvido, pelo que figura mais à frente, no **Capítulo 7 - Conclusões e Recomendações**, como um dos desenvolvimentos futuros da presente dissertação.

### 6.5.11 MÓDULO 9 – UTILIDADES

A partir do Módulo de Interface, referido em 6.5.2, é possível executar o chamado Módulo de Utilidades, que contém quatro sub-módulos, designados SAM MOD 9-1 (Criação de Espectro Empírico), SAM MOD 9-2 (Comparação de Registos), SAM MOD 9-3 (Detecção de Cristas em Registos) e SAM MOD 9-4 (Caracterização de Grupos de Onda). Também todos estes sub-módulos podem ser executados quer isoladamente, para análise dos mais variados tipos de sinais, quer em conjunto com outros módulos do pacote SAM.

O primeiro sub-módulo, permite a criação de vários tipos de espectros empíricos, dentre os mais conhecidos. Actualmente, estão previstos nesta aplicação os espectros empíricos de JONSWAP, Pierson-Moskowitz Generalizado, Pierson-Moskowitz (ITTC) e Bretschneider-Mitsuyasu (Fig. 6-28).

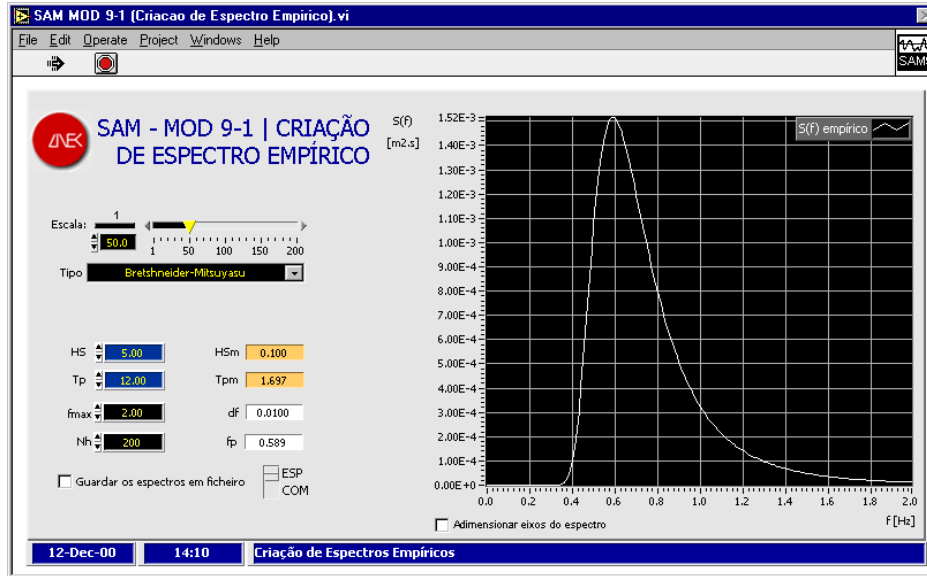


Fig. 6-28 - Aspecto do painel SAM MOD 9-1 (Criação de Espectro Empírico)

O sub-módulo SAM MOD 9-2 possibilita a comparação entre registos e o cálculo do desvio médio quadrático entre estes, com eventual deslize temporal do registo obtido para melhor concordância com o pretendido. Este módulo, utilizado nos cálculos da Secção 5.7.1, também permite o cálculo de parâmetros espectrais e de grupos de ondas. A Fig. 6-29 mostra um painel típico deste módulo.

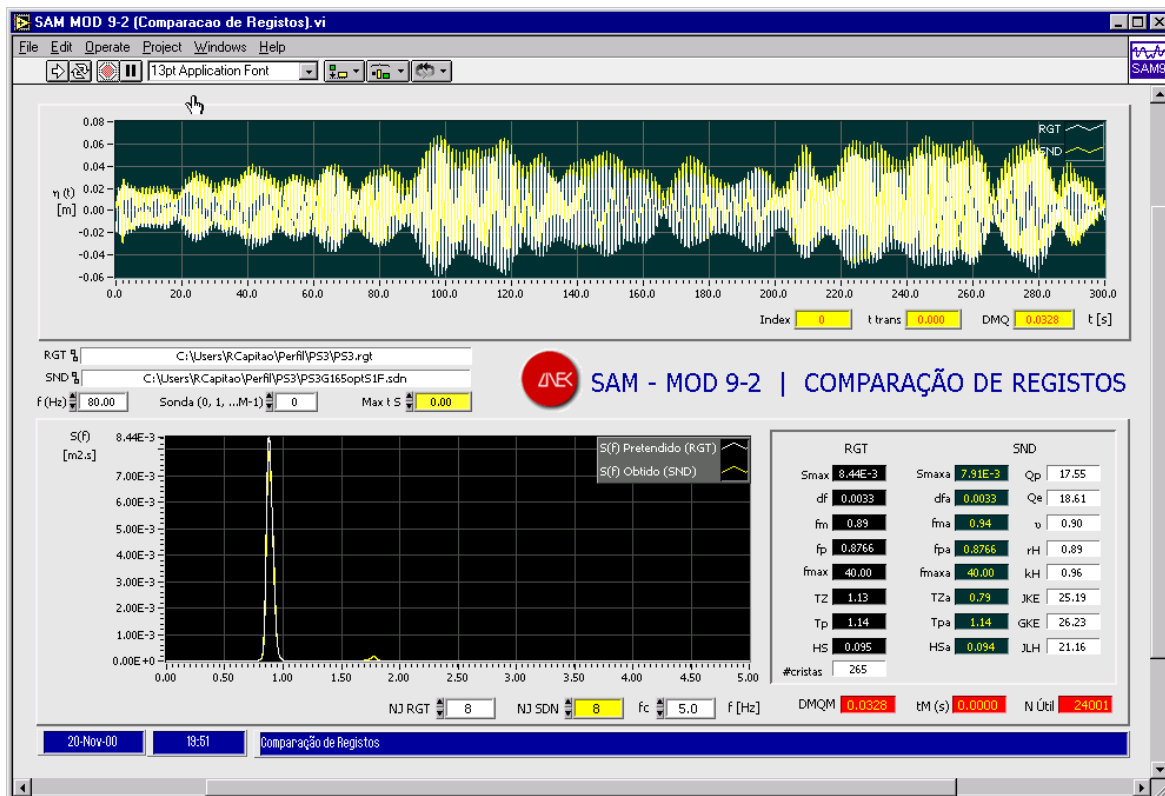


Fig. 6-29 - Aspecto do painel SAM MOD 9-2 (Comparação de Registos)

O terceiro sub-módulo de utilidades detecta e identifica cristas em registos de onda (Fig. 6-30). Esta rotina possibilita o cálculo das localizações e respectivas elevações das cristas de um sinal dado. Quer utilizado isoladamente, quer em conjunto com outras rotinas, este sub-módulo permite também calcular  $E[J]$ , através do chamado método directo – Ver descrição “DIR” em 3.7.1.

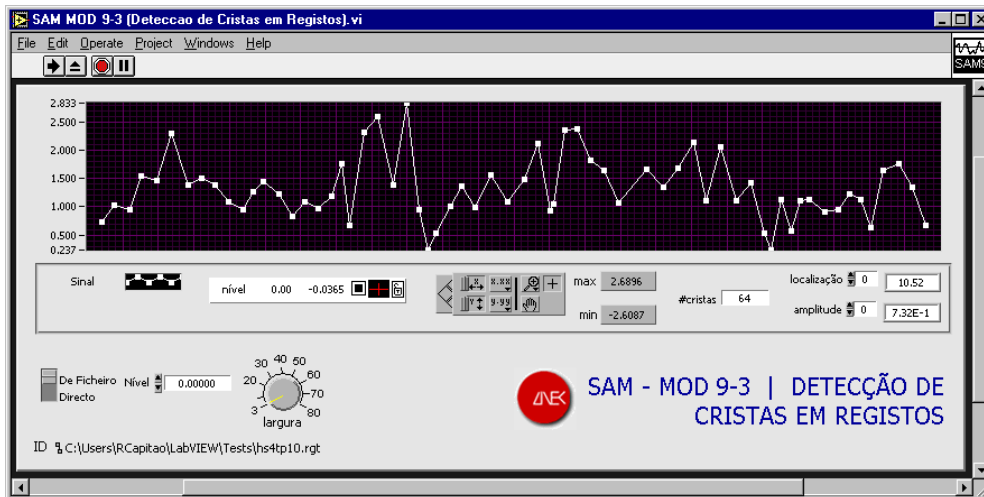


Fig. 6-30 - Aspecto do painel SAM MOD 9-3 (Deteccão de Cristas em Registos)

Finalmente, o último sub-módulo de utilidades permite a caracterização de grupos em registos de onda (Fig. 6-31).



Fig. 6-31 - Aspecto do painel SAM MOD 9-4 (Caracterização de Grupos de Onda)

Com este sub-módulo, pode-se analisar um sinal, sob o ponto de vista do comportamento de grupos de ondas, utilizando os métodos descritos no Capítulo 3, nomeadamente o método de Kimura Espectral, as fórmulas de Longuet-Higgins e o método directo. Para executar este módulo isoladamente, torna-se apenas necessário introduzir o nome do ficheiro onde se encontra o sinal a analisar, a frequência de digitalização do referido sinal e a altura de agrupamento  $H_c$ , a partir do qual se

considera que existem grupos de ondas. Os resultados são constituídos, para cada altura  $H_c$  (ou nível  $v$ ), por valores de  $E[J]$  e  $E[G]$ , para os diferentes métodos, e por parâmetros espectrais característicos do sinal dado (no painel da Fig. 6-31, JKE e GKE significam, respectivamente,  $E[J]$  e  $E[G]$  pelo método de Kimura Espectral, e JLH significa  $E[J]$  pelas fórmulas de Longuet-Higgins).

## 6.6 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO PRÁTICA

Nesta secção apresentam-se vários exemplos práticos da utilização do pacote SAM. Pretende-se, assim, “percorrer” praticamente todos os módulos do pacote, utilizando, para isso, quando necessário, ficheiros de registos típicos.

Estes exemplos de aplicação poderão ser reproduzidos pelo utilizador do CD que acompanha este trabalho, mediante utilização, se aplicável, dos ficheiros mencionados em cada exemplo. Estes ficheiros podem ser encontrados no directório de instalação do pacote SAM.

### 6.6.1 EXEMPLO Nº 1: OBTENÇÃO DAS ORDENADAS DE DADO ESPECTRO EMPÍRICO

Pretende-se obter, à escala 1:50, as ordenadas do espectro de JONSWAP com as seguintes características de protótipo:  $H_s = 5\text{ m}$ ;  $T_p = 12\text{ s}$ ;  $\gamma = 3.3$ . Utiliza-se, para isso, o sub-módulo SAM MOD 9-1 (Criação de Espectro Empírico), Fig. 6-32.

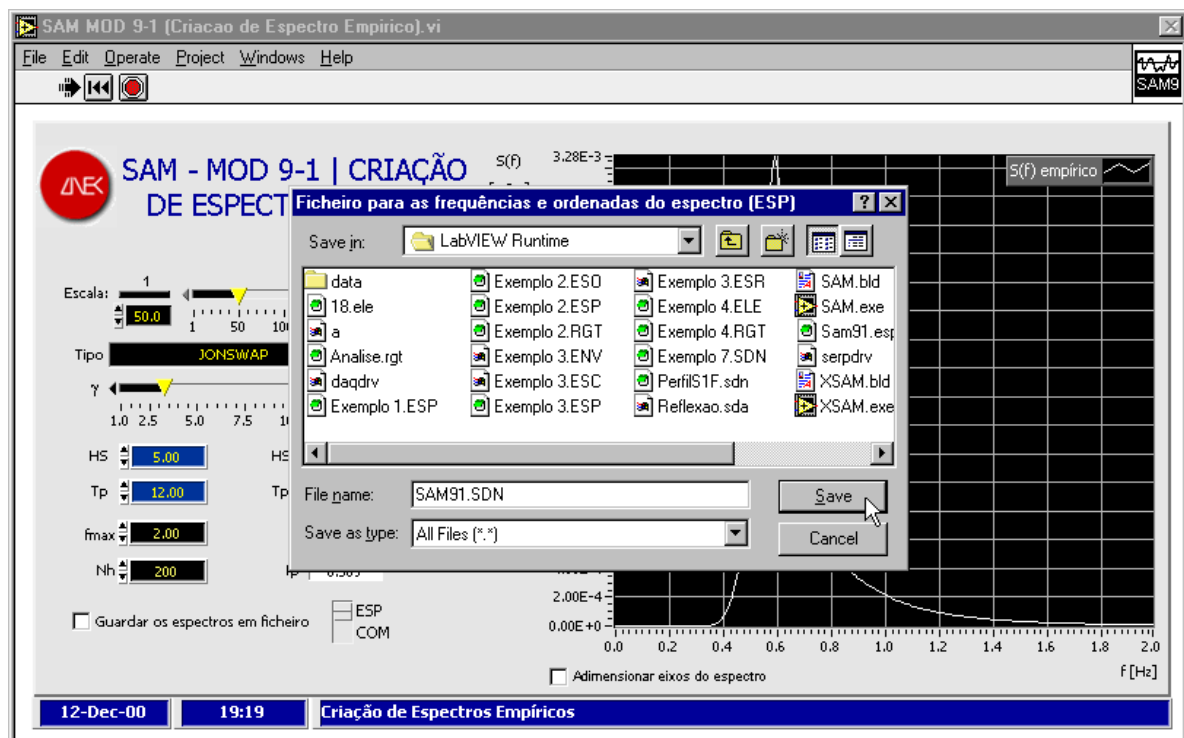


Fig. 6-32 - Exemplo nº 1 - Criação de Espectro Empírico

Neste exemplo, será criado um ficheiro de nome "SAM91.ESP" contendo duas colunas de valores com os pares (frequência, ordenada do espectro). Este ficheiro poderá servir mais tarde para utilização noutra rotina do pacote de *software*.

### 6.6.2 EXEMPLO Nº 2: SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM REGISTO COM BASE NUM DADO ESPECTRO EMPÍRICO

Neste exemplo, quer-se obter, à escala 1:50, um registo de espectro idêntico ao do Exemplo nº 1 da secção anterior. Para isso, será utilizado o sub-módulo SAM MOD 1-1 (Simulação Base Espectro), Fig. 6-33.

Assim, será calculado novo espectro com as características mencionadas e será criado um ficheiro de nome "SAM11.RGT" contendo duas colunas de valores com os pares (instante do tempo, elevação da superfície), assim como dois outros ficheiros contendo o espectro pretendido, "SAM11.ESP", e o espectro obtido, "SAM11.ESO". Este ficheiro poderá servir mais tarde para utilização noutra rotina do pacote de *software*.

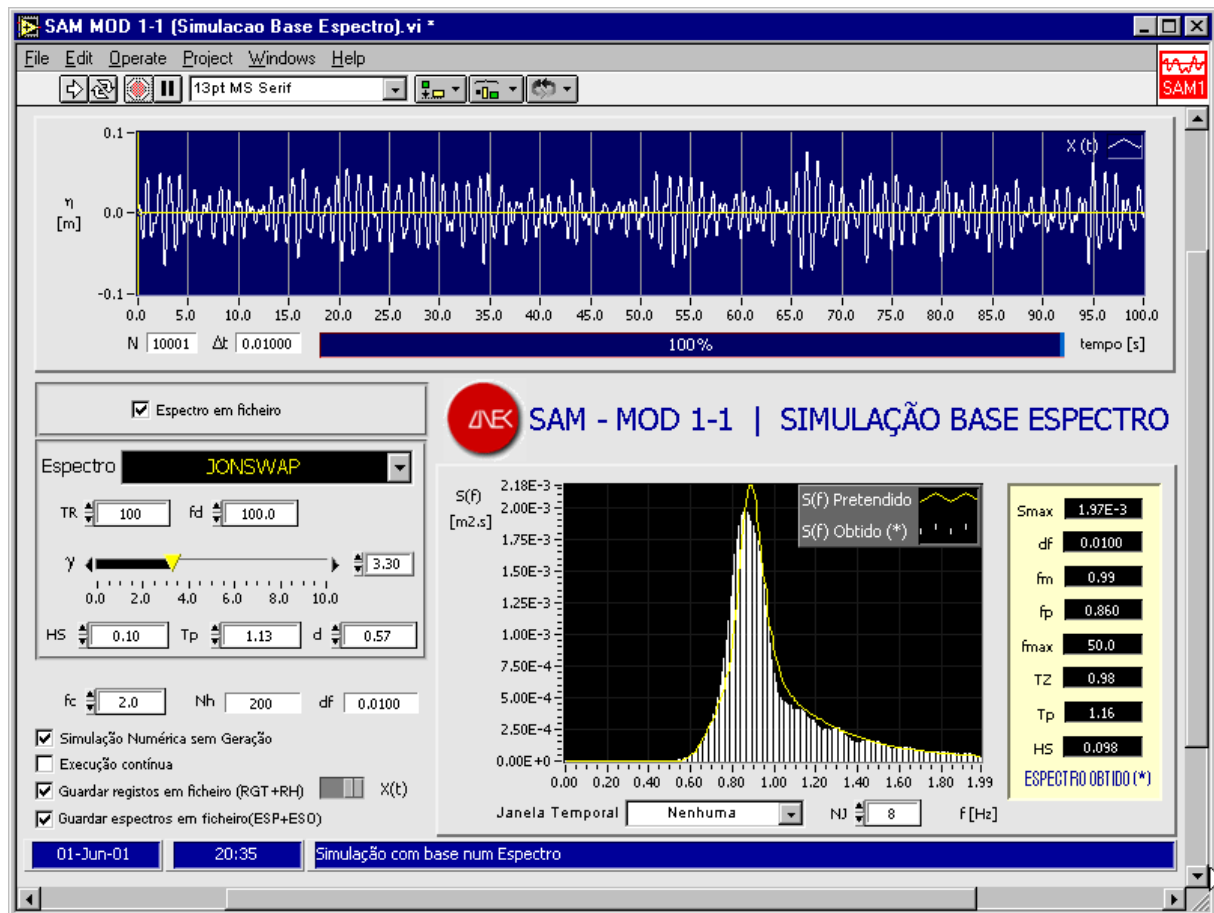
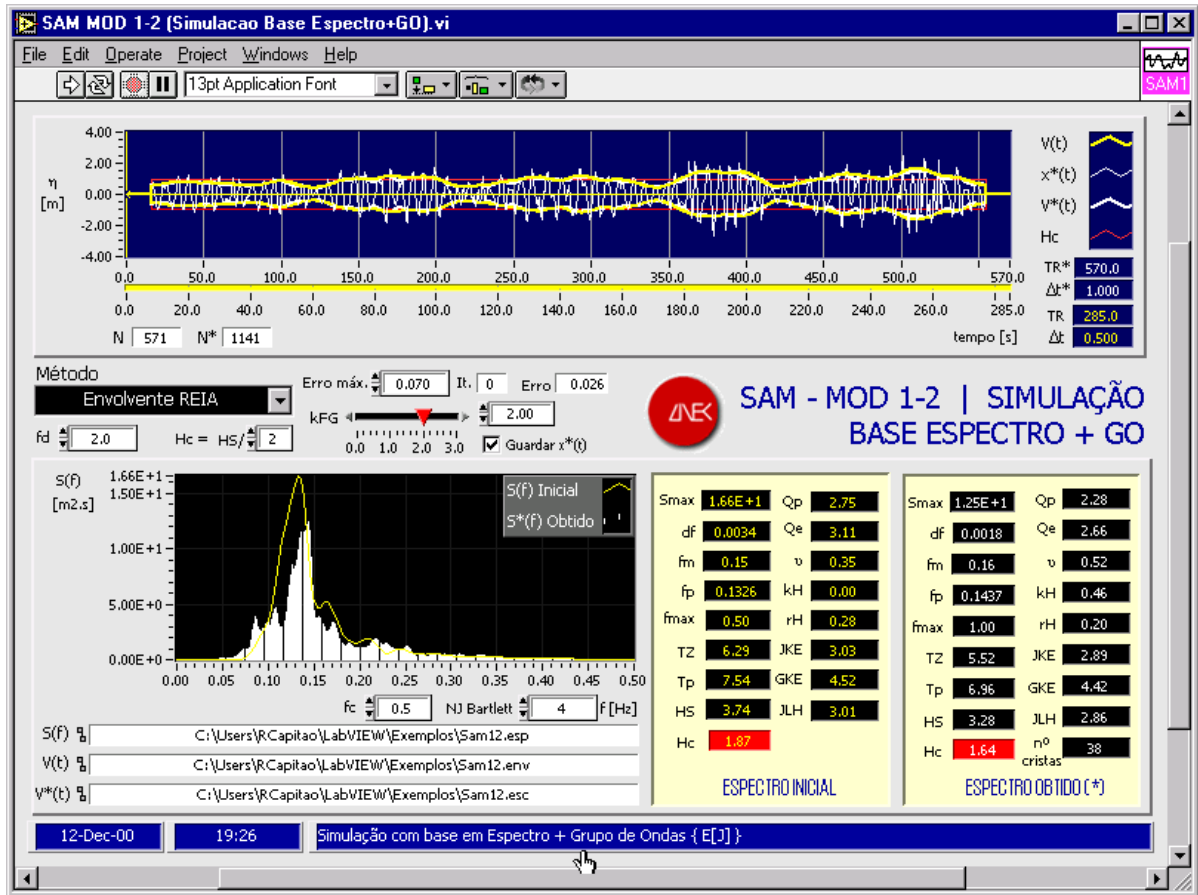


Fig. 6-33 - Exemplo nº 2 - Simulação numérica de um registo com base num dado espectro empírico



6.6.3 **EXEMPLO Nº 3: SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM REGISTO COM ESPECTRO EMPÍRICO E ENVOLVENTE DADOS**

Pretende-se agora encontrar um registo de espectro "SAM12.ESP", e, para além disso, com uma dada envolvente dada pelo ficheiro "SAM12.ENV". Utiliza-se o sub-módulo SAM MOD 1-2 (Simulação Base Espectro+GO), Fig. 6-34.



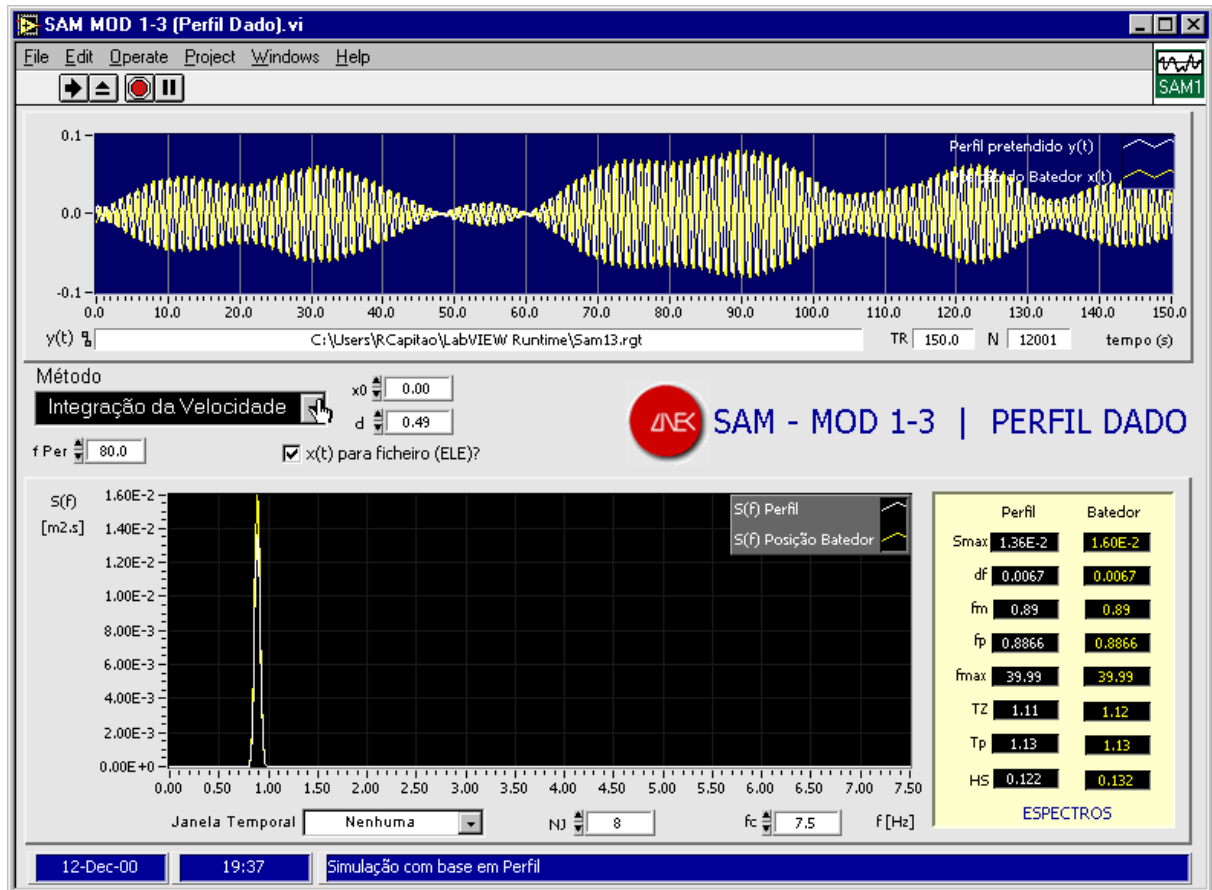
**Fig. 6-34 - Exemplo nº 3 - Simulação numérica de um registo com espectro empírico e agrupamento de ondas (E[J]) dados**

Assim, será criado um ficheiro contendo duas colunas de valores com os pares (instante do tempo, registo da elevação da superfície) do novo registo escalado. Será igualmente criado um ficheiro com a envolvente, do tipo REIA, de nome "SAM12.ESC", deste registo escalado. Ambos os ficheiros poderão servir mais tarde para outro tipo de cálculos.

Este módulo aplica, como se disse, o método da escalagem, da Secção 4.3.1.2, que, por sua vez, utiliza o método iterativo REIA, referido na Secção 4.3.1.1.

6.6.4 **EXEMPLO Nº 4: DETERMINAÇÃO DE UM FICHEIRO DE COMANDO PARA O BATEDOR, POR FORMA A OBTER UM DADO PERFIL NA ÁGUA**

Vai-se agora construir um ficheiro de comando para o batedor, por forma a que aquele, ao alimentar o batedor, produza um certo perfil (SAM13.RGT) na água. Utiliza-se, por conseguinte, o sub-módulo SAM MOD 1-3 (Perfil Dado), Fig. 6-35.



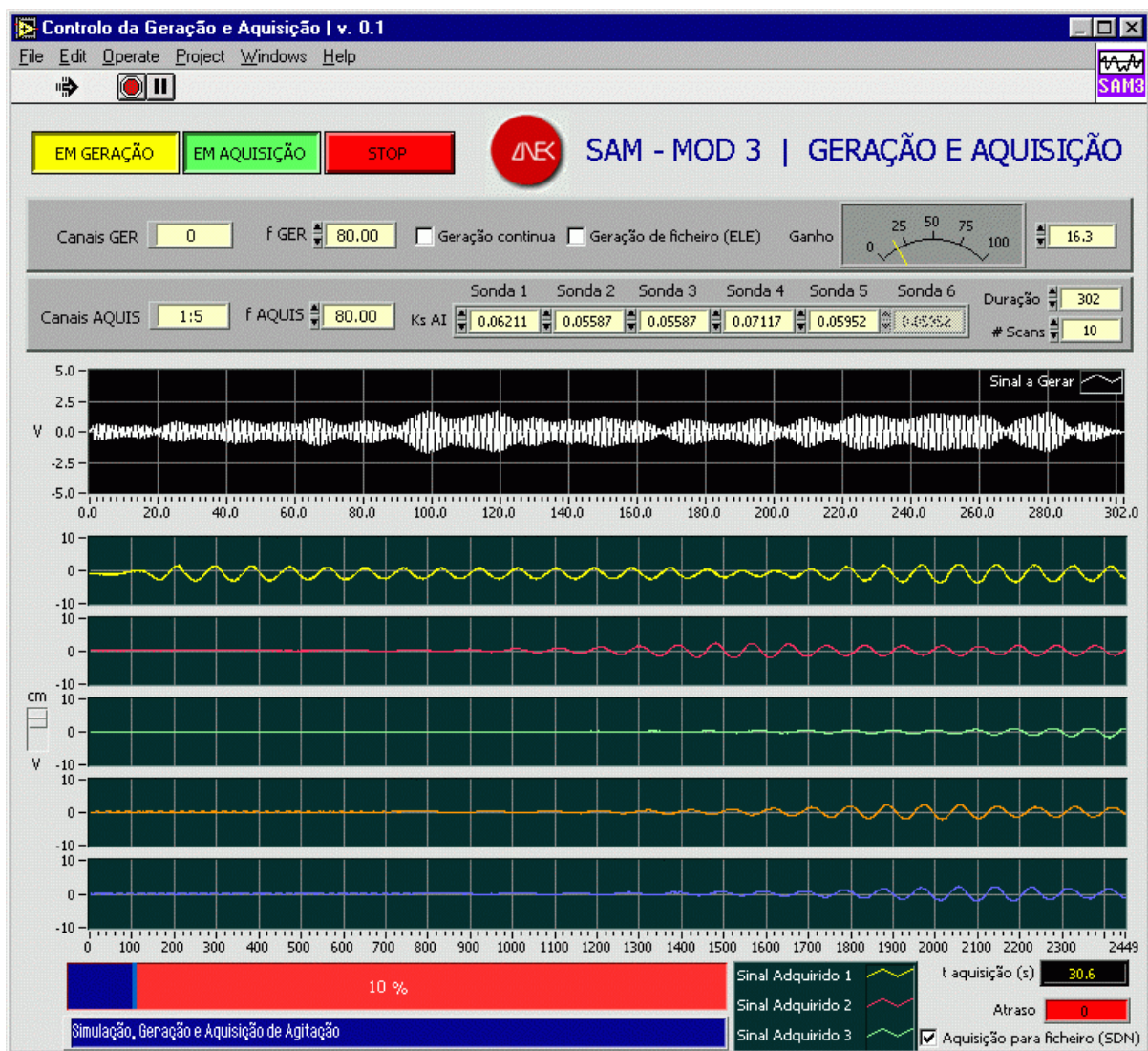
**Fig. 6-35 - Exemplo nº 4: Determinação de um ficheiro de comando para o batedor, por forma a obter um dado perfil na água**

Deste modo, será criado um ficheiro de comando do batedor, de nome "SAM14.ELE", contendo uma única coluna com valores compreendidos entre  $-2047$  cV e  $+2048$  cV. Este ficheiro será necessário para a fase da geração no canal.

6.6.5 **EXEMPLO Nº 5: GERAÇÃO DO SINAL NA ÁGUA CORRESPONDENTE AO FICHEIRO DE COMANDO OBTIDO NO EXEMPLO ANTERIOR**

Se se pretender agora “colocar” na água o ficheiro de comando do batedor criado no exemplo anterior, de nome “SAM14.ELE”, e fazer a respectiva aquisição em, por exemplo, cinco sondas, utiliza-se o módulo **SAM MOD 3 (Geração e Aquisição)**, Fig. 6-36.

Depois de efectuada a aquisição, será criado um ficheiro com as leituras das sondas, depois de afectadas pelas respectivas constantes características,  $K_s$  (de Volt para metro). Este ficheiro tem o nome “SAM3.SDN”, e contém tantas colunas, quantas as sondas. Este ficheiro será eventualmente necessário para análise posterior.



**Fig. 6-36 - Exemplo nº 5: Geração de um ficheiro de comando na água e correspondente aquisição**

6.6.6 EXEMPLO Nº 6: ANÁLISE ESPECTRAL DE UM REGISTO

A análise espectral de um dado registo, por exemplo o do ficheiro "SAM7.RGT", faz-se simplesmente utilizando o módulo SAM MOD 7 (Análise Espectral), Fig. 6-37. Como se vê nesta figura, é possível associar uma dada escala gráfica ao registo a analisar, por forma a obterem-se valores do modelo e do protótipo (na figura, a escala é de 1:1).

Este módulo de análise permite, também, interactivamente, modificar os eixos das abcissas e das ordenadas, fazer ampliações ou reduções de determinados trechos, quer do sinal em análise, quer do seu espectro, modificar a janela temporal, alterar o número de pontos considerados no alisamento do espectro, etc.

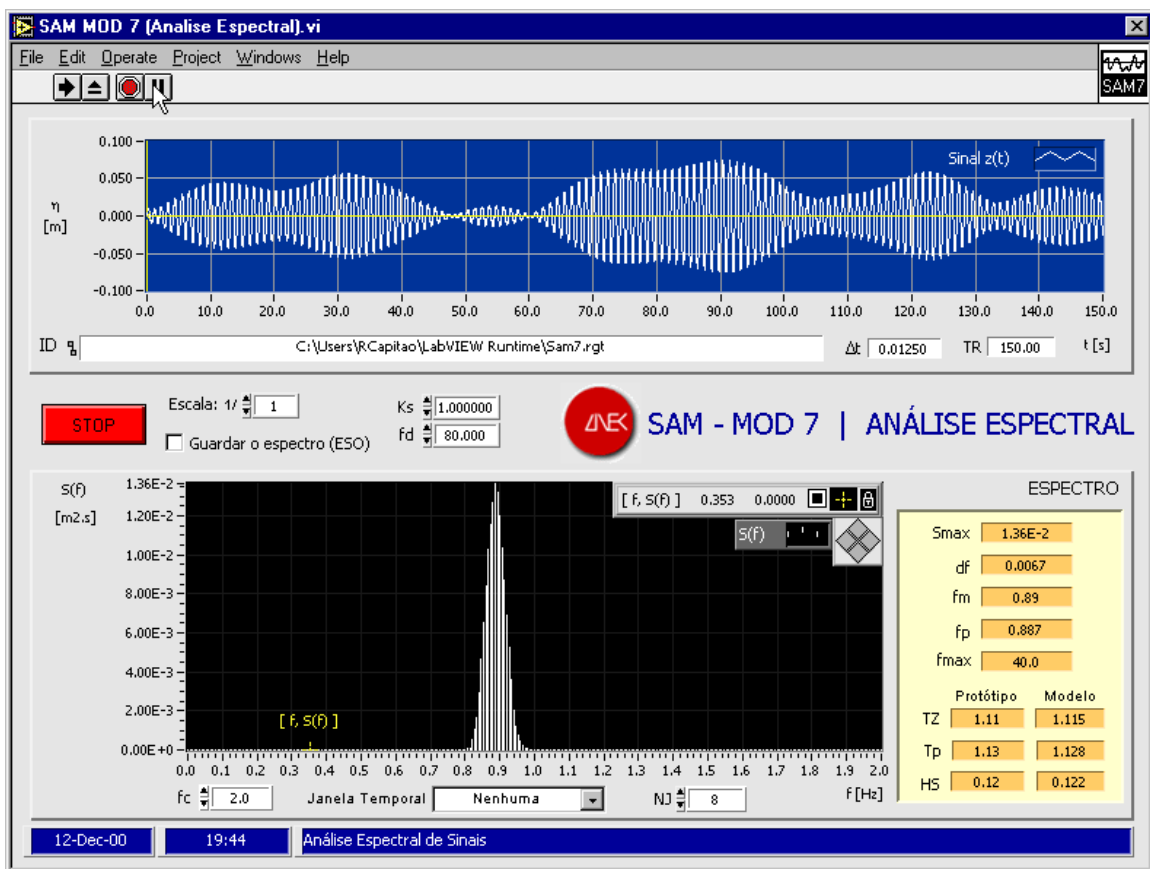


Fig. 6-37 - Exemplo nº 6: Análise espectral de um registo

6.6.7 EXEMPLO Nº 7: ANÁLISE DA REFLEXÃO

Efectua-se a análise da reflexão através da utilização do módulo SAM MOD 8 (Análise da Reflexão) - Fig. 6-38. Este módulo necessita de um ficheiro contendo duas ou mais colunas de valores correspondentes a registos simultâneos de igual número de sondas devidamente posicionadas no canal de ondas irregulares, segundo as recomendações de Goda, 1985.

O ficheiro neste exemplo, de nome "SAM8.SDN" contém dados coligidos em três sondas, pelo que o método utilizado na separação é o das  $M$  sondas, descrito em 5.5.2.2 ( $M = 3$ ).

Para a separação dos espectros incidente e reflectido (na figura, a azul e a encarnado respectivamente), houve que introduzir os valores das diversas distâncias entre sondas e batedor, os valores das constantes características de cada sonda (para possibilitar a conversão entre valores de tensão eléctrica e valores da altura da superfície da água), assim como a escala geométrica considerada (se for necessária).

Os resultados que se obtêm são, entre outros, os valores da altura significativa incidente e reflectida e, nos locais das sondas, os períodos de pico e médios correspondentes e os coeficientes de reflexão global calculados de acordo com as Eqs. (5-82) e (5-83) da Secção 5.5.6.

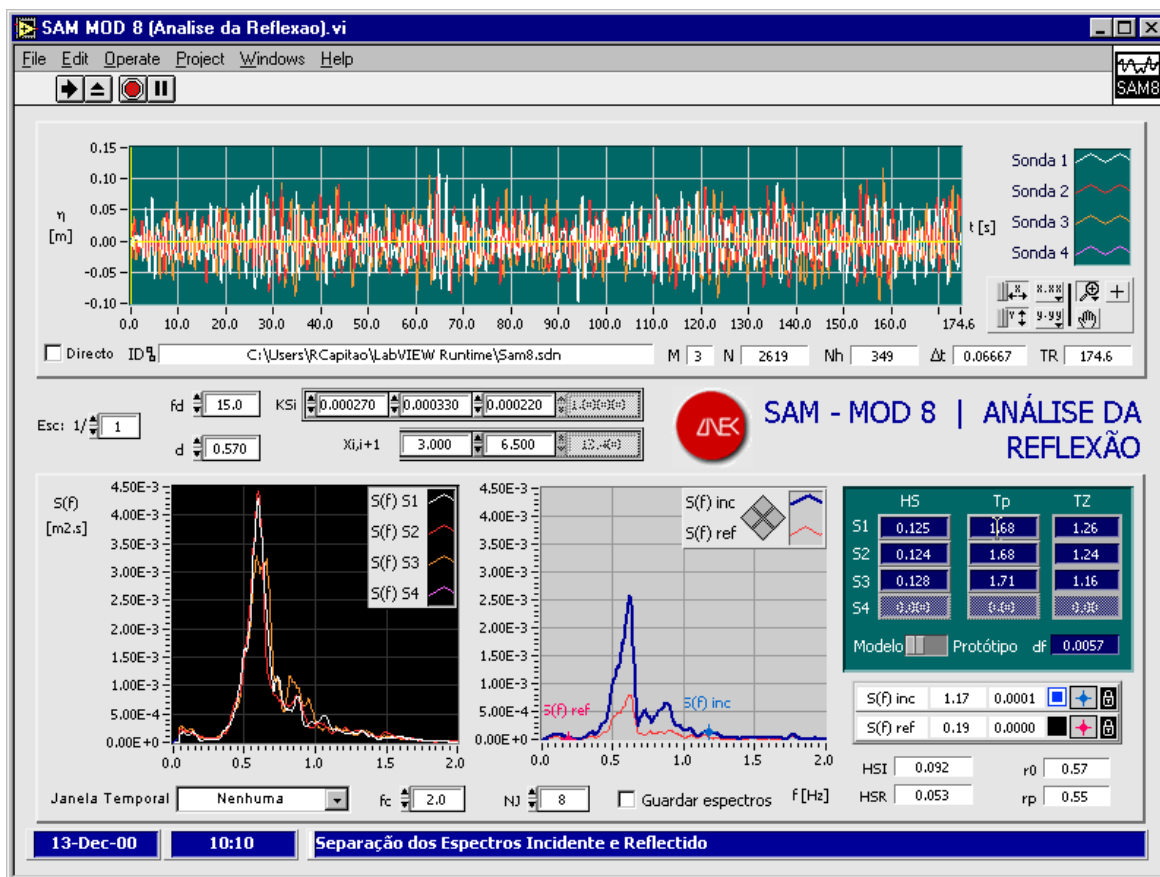


Fig. 6-38 - Exemplo nº 7: Análise da reflexão

## 6.7 CONCLUSÕES

Neste capítulo, apresentou-se o pacote de *software* SAM - Simulação da Agitação Marítima, o qual terá utilidade em instalações de ondas irregulares de laboratórios de hidráulica marítima para caracterização, simulação, geração e aquisição da agitação marítima. O pacote SAM é constitu-

ído por um conjunto de módulos e sub-módulos, os quais correspondem às diversas fases seguidas num ensaio típico.

A descrição ao longo deste capítulo destes módulos e sub-módulos teve um formato próximo da que habitualmente se encontra num manual de utilização de *software*.

Porém, para melhor se compreender o modo como os diversos módulos se interligam, dever-se-á executar o pacote **SAM**. Claro que para utilizar convenientemente este pacote há necessidade de o utilizador conhecer com razoável profundidade a teoria que está na base de cada um dos módulos utilizados, pelo que é recomendável a leitura dos capítulos anteriores, principalmente o **Capítulo 5 - Simulação e Modelação Física de Agitação Marítima**. No entanto, a própria leitura dos menus de ajuda (tanto o geral, como o de execução) presentes em cada módulo poderá ser de grande utilidade para a compreensão dos métodos e técnicas empregues.

Para ilustrar o modo de execução de alguns dos módulos do pacote **SAM**, apresentaram-se exemplos práticos através da utilização, quando necessário, de ficheiros de registos típicos, os quais poderão ser reproduzidos pelo utilizador do disco compacto (CD-ROM) que acompanha este trabalho.

Notar que a execução deste pacote não dispensa um exame cuidadoso dos resultados obtidos.

Espera-se, a breve trecho, evidentemente fora do âmbito do presente trabalho, remodelar e complementar este capítulo com o objectivo de produzir um manual de utilização mais completo do pacote de *software* **SAM**, para acompanhar a versão executável.

# PARTE IV





# CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

---

## 7.1 GENERALIDADES

Nesta dissertação sobre simulação e modelação estocástica numérica e física da agitação marítima, procurou-se descrever e modelar a agitação de curto prazo, isto é, a que se refere a registos de duração compatível com a hipótese de estacionariedade (considera-se que os registos de 20 minutos de duração, obtidos de 3 em 3 horas podem ser modelados por um *processo estocástico estacionário*), por oposição ao tratamento de longo prazo, no qual se estuda o regime ao longo dos anos em certo local.

Pretendeu-se, em primeiro lugar, simular numericamente sinais idênticos aos obtidos na natureza. No entanto, não foi este o objectivo último do presente trabalho. Os sinais numéricos simulados terão de ser produzidos na água de um canal ou tanque físico, por forma a que modelos de obras costeiras e portuárias possam ser convenientemente testados, isto é, de acordo com o que se passa na realidade.

Para averiguar se o que se está a produzir na água é, de facto, aquilo que se pretende, há necessidade de recolher dados em sondas colocadas no canal ou tanque e, depois, tratar esses dados para posterior análise. Para isso, contou-se com um conjunto de ferramentas estocásticas ou probabilísticas que, para além de resolver os problemas propostos, possibilitou a compreensão dos mecanismos principais do fenómeno complexo que é a agitação marítima irregular.

A compreensão destes mecanismos permitiu, por um lado, organizar o presente trabalho como uma sequência de assuntos relacionados e interligados, coligidos ao longo do percurso do estudo para doutoramento, e, por outro, a produção de um conjunto extenso de rotinas computacionais, também elas formando uma sequência interligada, destinadas ao tratamento e simulação da agitação marítima. Ambos os conjuntos acima referidos são importantes, apesar de, neste trabalho, o segundo, o computacional, parecer menor, sem o ser, dado o menor número de páginas a ele dedicado. O trabalho computacional envolvido pode, no entanto, ser avaliado com a utilização do pacote de *software* incluído na presente dissertação.

São vários os aspectos em que se pode melhorar o trabalho apresentado. O mais evidente, no entender do autor, é o que se prende com o facto de o número de ensaios realizados, tanto numéricos como físicos, não ser suficientemente grande. Contudo, há que referir que os ensaios efectuados tiveram, preferencialmente, o objectivo de verificarem métodos aqui desenvolvidos e não estudar exaustivamente os diferentes fenómenos. Outro aspecto terá a ver com o exíguo desenvolvimento que foi possível dar a alguns desses métodos. Não deverá ignorar-se, no entanto, que esta

é uma dissertação de Engenharia Civil onde o que se procura prioritariamente é um conjunto de ferramentas (métodos, procedimentos, algoritmos e programas computacionais) que permita tratar a agitação de curto prazo por forma a responder às exigências dos projectistas de obras marítima e portuárias, assim como uma descrição o mais acessível possível aos utilizadores de tais ferramentas. O presente documento tem, assim, a pretensão de ser um utensílio de ajuda para a utilização de tais ferramentas de engenharia.

A seguir, nas duas próximas secções, sintetizam-se as principais conclusões alcançadas nas Partes II e III, respeitantes, respectivamente, às partes teórica e prática deste trabalho.

## 7.2 PARTE II – SIMULAÇÃO/MODELAÇÃO NUMÉRICA E FÍSICA

Estas conclusões referem-se à parte teórica do presente trabalho, constituída pelos Capítulos 2 a 5.

O **Capítulo 2 - Caracterização Geral da Agitação Marítima** apresenta-se necessariamente pouco aprofundado pois versa matéria conhecida de hidráulica e de probabilidades, de âmbito bastante geral. Achou o autor desta dissertação que não devia entrar em demasiados pormenores nesta parte mais geral porque desse modo estaria a desviar-se do tema principal do trabalho proposto: a simulação estocástica numérica e física da agitação marítima.

Naquele capítulo, apresentaram-se de uma forma muito sumária os métodos e ferramentas destinados à caracterização de ondas, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. Pode afirmar-se que, para uma caracterização suficientemente completa, é necessário usar os dois tipos de análise, sendo ambas as perspectivas formas diferentes de descrição de uma mesma realidade, que é geralmente a informação contida num sinal. A Transformada de Fourier é a ferramenta matemática que permite a passagem do domínio do tempo para o domínio da frequência e vice-versa.

Foram também abordadas neste capítulo as teorias linear da onda e dos sistemas, ferramentas básicas utilizadas nos desenvolvimentos do restante trabalho.

No **Capítulo 3 - Caracterização de Grupos de Ondas**, apresentaram-se vários métodos de caracterização dos grupos de ondas, a partir de propriedades gerais dos registos, susceptíveis de associação a efeitos em obras marítimas.

Consideraram-se dois grupos distintos de métodos indirectos de tratamento dos grupos de ondas:

**Métodos que usam as séries de alturas de onda:** *o método dos chorrilhos (MC)*, de Goda, 1976, e Black, 1978, *o método de Kimura (MK)*, de Kimura, 1980, e um seu refinamento, *o método de Kimura Espectral (KE)*. Em todos estes métodos, a caracterização dos grupos de ondas é abordada numa perspectiva discreta.

**Métodos que usam as envolventes das ondas:** *o método da envolvente*, sendo esta função calculada através, quer da teoria de Rice, 1954, quer da transformada de Hilbert (RH ou RHa), *o método REIA (REIA)* e *as fórmulas de Longuet-Higgins (LH)* e de Cramér e

Leadbetter, 1967 (ENV). Estes métodos adoptam uma perspectiva contínua da caracterização dos grupos de onda.

Para avaliar os métodos indirectos acima mencionados, foi utilizado o *método directo de caracterização de grupos de ondas* (DIR), que consiste em determinar directamente, a partir do próprio registo, toda a informação respeitante aos grupos de ondas que realmente ocorrem.

O programa **AGRUPA**, inicialmente escrito em linguagem de programação Pascal foi, mais tarde, transposto para linguagem gráfica *G*, e incorporado no pacote de *software* **SAM** no módulo **SAM MOD 9-4 (Caracterização de Grupos de Onda)**. Ambos os programas permitem obter parâmetros espectrais gerais e fazer a análise das características dos grupos de ondas para vários níveis, através do cálculo, com os métodos acima mencionados, do valor médio do número de ondas dos grupos de ondas,  $E[J]$ , do valor médio do número de ondas entre dois grupos de ondas sucessivos,  $E[G]$  e do valor médio do número de grupos de ondas num certo registo,  $E[N_G]$ .

A comparação destes métodos foi estabelecida a partir da análise dos resultados relativos quer aos parâmetros acima referidos ( $E[J]$ ,  $E[G]$  e  $E[N_G]$ ), quer aos parâmetros espectrais ( $Q_p$ ,  $Q_e$ ,  $\nu$  e  $\kappa$  - ver definições em 3.7.2, pág. 67), e foi concretizada através da análise de vários registos de onda, reais (vindos de observações de sondas colocadas no canal de ondas irregulares do LNEC) e simulados em computador. Para essa comparação, considerou-se como método de referência o referido método directo (cálculo directo dos valores a partir dos registos).

Os resultados obtidos, tanto no caso dos registos reais como no dos registos simulados, permitiram eleger os métodos de Longuet-Higgins (LH) e Kimura Espectral (KE) como os mais adequados, pois verificaram-se parâmetros de agrupamento de ondas idênticos aos do método directo. Concluiu-se também serem de rejeitar os métodos baseados no conceito de envolvente (ENV, RH, RHa e REIA), os dois primeiros porque se obtiveram parâmetros de agrupamento de ondas nítida e sistematicamente inferiores aos do método directo, e os dois últimos, porque se verificou serem mais incertos por força da arbitrariedade das características do alisamento utilizado. A REIA é em particular incapaz de identificar grupos de ondas quando o nível de agrupamento,  $\nu$ , é elevado (por exemplo, para  $\nu = H_S/2$ )

Nesta parte do estudo, confirmou-se que há uma relação bastante forte entre os parâmetros espectrais,  $Q_p$ ,  $Q_e$ ,  $\nu$  e  $\kappa$ , que, nalguns casos, é praticamente linear, e que o comportamento destes reflecte-se, em média, nos parâmetros  $E[J]$ ,  $E[G]$  e  $E[N_G]$ . Deste modo, parece confirmar-se que *o espectro determina a existência de mais ou menos grupos de ondas*. No entanto, a relação espectro - grupos de ondas, apesar de ser significativa, não é absoluta, dando possibilidades de manipular as características de agrupamento de ondas através das fases. O parâmetro  $GF$  de Funke e Mansard, 1979, não foi considerado desde início pelas razões oportunamente aduzidas.

As dúvidas existentes sobre o facto de a distribuição de  $D$ , a duração do grupo de ondas, ser a exponencial, como consideram Nolte e Hsu, 1972, levaram a fazer um teste visual deste modelo com base num registo muito longo simulado numericamente.

Assim, com base no cálculo das durações dos grupos de ondas do registo numérico acima referido, usando o método directo (tido, como se disse, como o mais correcto), verificou-se que a distribuição geométrica é adequada para a sua modelação numa abordagem do tipo discreto, sendo o modelo exponencial, com ou sem parâmetro de localização, apropriado numa abordagem do tipo contínuo, nas condições em que ele foi considerado, isto é, como mera transposição do número de ondas para duração contínua, por multiplicação pelo período médio de onda.

No **Capítulo 4 - Simulação Numérica de Agitação Marítima**, foram apresentados diversos métodos de simulação numérica de sinais, tendo sido dada especial ênfase à simulação de grupos de ondas. Consideraram-se os métodos existentes baseados no conceito de envolvente e a chamada simulação condicionada.

Foi desenvolvido um novo método, denominado *método da escalagem*, ME, para determinação de registos ou sinais com uma dada envolvente, dado  $E[J]$  e dado espectro, com base na mudança de escala do eixo temporal da função envolvente dada. Apresentaram-se exemplos de aplicação do referido método e fez-se a respectiva comparação das formas das envolventes inicial e escaladas, tendo-se verificado diferenças assinaláveis nos valores que se tomaram para comparação: valores médios dos grupos de ondas,  $E[J]$ . Estas diferenças poderão ser reduzidas através da imposição de um maior número de iterações no método iterativo REIA utilizado, ou substituição deste método iterativo por outro mais adequado.

Com o desenvolvimento do ME, é permitida a modificação da escala temporal de uma dada forma de envolvente, de modo a que mais ou menos (consoante se queiram mais ou menos grupos de onda) ondas caibam nessa forma da envolvente dada. Uma etapa final do método da escalagem passa pela utilização do método iterativo REIA, adaptação do método iterativo apresentado por Funke e Mansard, 1979, referido no Capítulo 3. Verificou-se que o método iterativo REIA (que permite a utilização de qualquer tipo de função envolvente) possibilita em poucas iterações a produção de um registo com as características pretendidas quando a envolvente inicial é suave. Porém, quando a envolvente dada é mais irregular, os resultados são piores.

Por outro lado, o *método da simulação condicionada*, SC, que permite a introdução de certos registos de temporais ou de grupos de ondas em registos contendo ondas de certo espectro, está funcional sob o ponto de vista numérico.

Foram inicialmente produzidos dois programas, **FASESPE** e **SIMCOND**, o primeiro desenvolvido propostamente para este estudo em linguagem de programação Pascal e o segundo adaptado de rotinas em linguagem de programação Fortran 77 desenvolvidas por Giménez *et al.*, 1990. O primeiro destes programas encontra-se agora integrado no pacote de *software* geral **SAM**, no módulo **SAM MOD 1-2 (Simulação Base Espectro+GO)**, descrito em pormenor no Capítulo 6. Pretende-se, fora do âmbito do presente trabalho, fazer o mesmo para o segundo programa.

No **Capítulo 5 - Simulação e Modelação Física de Agitação Marítima**, foram apresentados diversos métodos para simulação física de ondas irregulares com base num espectro, num espectro e grupos de ondas e apenas num registo.

Apresentaram-se as metodologias utilizadas na prática em laboratórios de hidráulica marítima para a geração de ondas irregulares com base num espectro de variância, nomeadamente através de síntese de séries temporais e através de filtragem electrónica de ruído branco.

Apresentaram-se também os *métodos das duas sondas e das M sondas*, destinados à obtenção dos espectros incidente e reflectido da agitação irregular não-direccional, a partir dos espectros observados em dois ou mais pontos situados ao longo de uma recta paralela à direcção de propagação da agitação.

Esta separação da agitação, possibilitará, mais tarde, fora do âmbito deste trabalho, o cálculo das compensações a dar aos movimentos do gerador de ondas, por forma a que as reflexões se tornem desprezáveis.

Verificou-se a exactidão teórica de ambos os métodos nos testes numéricos efectuados. Realmente, obteve-se uma total coincidência dos espectros incidentes reconstituídos com os espectros incidentes iniciais. Verificou-se, ainda, que o coeficiente de reflexão obtido, calculado, quer através de cada frequência do espectro, quer dos momentos de ordem zero, se apresenta muito satisfatoriamente idêntico ao coeficiente arbitrado de início e coincide mesmo para as frequências de interesse. Os resultados obtidos no canal de ondas irregulares foram, no entanto, apenas razoáveis.

Verificou-se, nesta fase de ensaios, que a reconstituição do espectro incidente é melhor quando se utiliza o método das *M sondas*, isto é, usando mais do que 2 sondas. Concluiu-se também que, para as condições do canal de ondas irregulares utilizado, a reflexão é mais importante para as frequências que contêm mais energia e que o coeficiente de reflexão apresenta um valor superior para o caso da utilização de espectros estreitos.

Como aplicação dos métodos de separação da agitação incidente e reflectida, procedeu-se a uma primeira avaliação da reflexão em canais de ondas irregulares considerando uma praia reflectora com a inclinação de  $45^\circ$ .

Verificou-se deste estudo de aplicação que, na prática, após um período inicial, cuja duração varia com o período típico das ondas introduzidas no canal, em que o sinal coligido nas sondas é apenas o da agitação incidente, a agitação registada passa a ser a que resulta da composição desta com a reflectida (na extremidade do canal ou no modelo de uma estrutura), a que se adiciona depois a re-reflectida no batedor, etc.. Para avaliar a intensidade destas *re-reflexões*, foi proposto neste trabalho o *índice de re-reflexão*,  $i_{RR}$ , dado pela Eq. (5-103). Este novo índice será útil em futuros ensaios a realizar no âmbito do estudo da reflexão de praias com outras inclinações para além da já ensaiada ( $45^\circ$ ).

Por outro lado, implementou-se pela primeira vez no canal de ondas irregulares do LNEC um método de geração de perfis de elevação da superfície da água. Trata-se do *método da integração da velocidade horizontal*, inicialmente proposto por Gravesen *et al.*, 1974, o qual permite a determinação de um perfil de elevações da superfície livre num ponto situado junto ao batedor de ondas, através da compatibilização da velocidade horizontal do batedor de ondas com a velocidade horizontal das partículas da água.

Verificou-se que o método proposto permite realmente reproduzir em laboratório, num canal ou tanque bidimensional, um certo perfil da superfície da água (por exemplo, um registo de agitação natural ou um registo simulado numericamente, com um dado espectro), quer junto ao batedor, quer a uma dada distância daquele. Infelizmente, verificou-se também que, apesar de se terem tomado precauções para minimizar as reflexões dentro do canal, estas, na realidade, ocorrem, ainda que bastante moderadas, pelo que os resultados deste (e de qualquer outro) método, por melhor que seja, serão sempre “corrompidos” pela reflexão.

Verificou-se que a transformação  $W$  do perfil desde o batedor até ao local onde se pretende obter um dado perfil de onda é não linear. Dos ensaios efectuados e dos resultados obtidos, verificou-se, porém, que a deslocação do perfil ao longo do canal se comporta como aproximadamente rígida. Assim, e considerando que um dos objectivos desta parte do estudo era o de produzir, em canal de ondas irregulares, um perfil de onda com o menor desvio possível em relação a um perfil de onda dado, deu-se preferência à aplicação do método da integração da velocidade horizontal nas condições correspondentes à situação ensaiada, em que, para efeitos de ajustamento do perfil obtido (na água) ao pretendido (pré-existente), se efectuou a translação temporal do perfil obtido, que conduz à minimização do desvio médio quadrático entre os dois. Foi, portanto, preterida a metodologia alternativa em que se aplica uma mudança de fases aos sinais a fornecer ao batedor de ondas (transformação linear do perfil ao longo do canal).

Com os desenvolvimentos obtidos no método acima referido de geração de perfis de elevação da superfície da água, o problema da geração física de elevações da superfície com espectro e grupos de ondas pré-especificados fica automaticamente resolvido; bastará, com efeito, considerar como sinal de entrada do método de geração de perfis o sinal produzido por um dos métodos de simulação numérica de registos, dados um espectro e grupos de onda, tratados no Capítulo 4.

### 7.3 PARTE III – PACOTE DE SOFTWARE “SAM”

Estas conclusões referem-se unicamente ao **Capítulo 6 - Software de Simulação Numérica e Física**.

Neste capítulo, apresenta-se uma importante componente do presente trabalho de doutoramento: o pacote de *software* **SAM - Simulação da Agitação Marítima**, a utilizar em canais de ondas irregulares de laboratórios de hidráulica para caracterização, simulação, geração e aquisição da agitação marítima.

Os nove módulos principais, assim como os seus sub-módulos, interligados e respeitantes às diversas fases seguidas num ensaio típico, foram descritos num formato próximo de um manual de utilização.

Com os métodos existentes no pacote de *software* **SAM** dispõe-se agora de um conjunto importante de ferramentas destinadas à simulação numérica e física de ondas, regulares ou irregulares, com

ou sem grupos de onda, o que permite estudar adequadamente a agitação marítima, com vista ao dimensionamento de obras costeiras ou portuárias.

Melhor do que a descrição apresentada no referido capítulo, é a execução do pacote **SAM** que permite, através da utilização dos ficheiros de dados apresentados como exemplo, uma melhor compreensão dos processos envolvidos e descritos ao longo dos Capítulos 2 a 5.

Refira-se, finalmente, que se pretende produzir um manual de utilização mais completo do pacote de *software* **SAM**, para acompanhar a versão executável.

## 7.4 RECOMENDAÇÕES E LINHAS DE INVESTIGAÇÃO FUTURAS

Como já se referiu anteriormente, o âmbito bastante geral e extenso que se imprimiu a este trabalho não permitiu que alguns aspectos dos métodos de simulação numérica e física abordados neste trabalho fossem suficientemente aprofundados. Tais desenvolvimentos requerem trabalho específico aturado e simulações numéricas e físicas sistemáticas mais demoradas, não consentâneos nem com a duração, nem com o propósito do presente trabalho de doutoramento, o qual, recorde-se, era o de estabelecer métodos de caracterização, simulação numérica e física e análise da agitação marítima irregular em canal ou tanque de ondas, através de adequada transposição desses métodos para programas computacionais.

Apresentam-se, de seguida, os temas que justificam um desenvolvimento mais profundo e que poderão constituir matéria de investigação de trabalhos futuros.

### **Distribuições das durações de excursão superior, inferior e total de envolventes de registos de onda**

Como se referiu em 3.4, Cramér e Leadbetter, 1967, apresentaram alguns resultados sobre as distribuições das durações de excursão superior,  $Q$ , inferior,  $D$ , e total,  $F$ , de envolventes de registos de onda, mas apenas para o caso de o registo ser um processo estocástico normal, estacionário e ergódico. Nolte e Hsu, 1972, adoptam para  $D$  a distribuição exponencial, com base em considerações teóricas que consistem em admitir que o número de vezes que a envolvente cruza o nível  $v$ , para cima ou para baixo, no intervalo  $(0, t)$ ,  $N(t)$ , é um *processo estocástico* (PE) de Poisson. Claramente, há necessidade de avançar com mais estudos sobre as distribuições das variáveis  $D$ ,  $Q$  e  $F$ .

### **Método da escalagem**

O *método da escalagem*, introduzido pela primeira vez neste trabalho, necessita de ser verificado com um conjunto de ensaios sistemáticos, bastante vasto, que possibilitem não só a consideração de diversos tipos de espectros, como foi feito neste trabalho, mas também, para cada um destes espectros, um conjunto de combinações de altura de onda e período bastante mais abrangente. Neste trabalho, o estudo do método da escalagem teve um carácter numérico. Apesar de a

sua implementação no canal ser fácil, se se usar o método de geração de perfis de elevação descrito na Secção 5.7, há que realizar um conjunto de ensaios físicos para a sua validação.

#### **Método da simulação condicionada**

O *método da simulação condicionada* apresenta-se plenamente funcional. Contudo, visto que a programação deste método em computador foi efectuada em linguagem Fortran 77 (linguagem pouco recente) e todos os outros métodos explanados neste trabalho foram programados em linguagem G (ambiente LabVIEW), há que tratar os resultados do método da simulação condicionada com um formato adequado para servirem de dados de entrada nos citados programas em G. Esta interface, actualmente necessária por se estarem a compatibilizar duas linguagens de programação completamente distintas, poderia ser evitada se o método fosse “traduzido” para G. Tal não se afigurou possível pelas limitações de tempo já citadas. Também neste tema fazem falta ensaios físicos, igualmente exequíveis com a ajuda do método de geração de perfis de elevação.

#### **Características da reflexão em praias com diversas inclinações**

Como se referiu na Secção 5.5.13, foi construída no canal de ondas irregulares do LNEC, uma praia reflectora, impermeável, concretizada através de uma placa de madeira articulada para possibilitar diversas inclinações. Desta forma, poderia ser avaliada a influência da inclinação da praia no coeficiente de reflexão global. Por falta de tempo, só a praia inclinada a  $45^\circ$  foi objecto de ensaio. Porém, o plano inicial consistia em considerar não apenas uma única inclinação, mas várias. Deste modo, este conjunto de ensaios com várias inclinações de praia permitiria uma contribuição interessante para uma melhor compreensão dos fenómenos físicos envolvidos num ensaio físico típico em canais de ondas irregulares, para uma melhoria do programa existente para a separação dos espectros incidente e reflectido e, finalmente, para averiguar possíveis deficiências no sistema preparação–geração–controlo–aquisição–tratamento existente no Núcleo de Portos e Praias do LNEC. Prevê-se que este assunto seja tema de um próximo trabalho de investigação, em cooperação com a Fundação Universidade do Rio Grande (FURG), Brasil.

#### **Formas complementares de espectros empíricos no pacote SAM**

Estão previstas no módulo **SAM MOD 9-1 (Criação de Espectro Empírico)** as formas dos espectros empíricos mais conhecidos. Seria interessante introduzir no código G desse módulo outras formas de espectro menos conhecidas. Em particular, a utilização de espectros multi-modais parece ser uma maneira de reproduzir correctamente alguns estados de mar já assinalados na costa portuguesa (Pires Silva, 1991).

#### **Outros métodos de simulação complementares no pacote SAM**

Apesar de o pacote de *software* SAM estar já bastante desenvolvido, verifica-se que há sempre possibilidade de adicionar outros métodos de simulação, para complementar os já existentes. Isso permitiria, quando adequado, a comparação entre diferentes métodos de obtenção do



mesmo objectivo. Salientam-se, neste âmbito, dois métodos de reprodução de registos com base em espectro (método da filtragem digital – Secção 4.2.1 e métodos paramétricos – Secção 4.2.2), dois métodos de reprodução de perfis de elevação (método da teoria dos filtros – Secção 5.7.2 e método da decomposição de Fourier – Secção 5.7.3) e os métodos SIRW e LASA – Secção 5.5.1, para separação da agitação incidente e reflectida em tempo real.

#### **Compensação do movimento do batedor para evitar reflexões**

Trata-se seguramente da tarefa mais complexa a realizar. Os chamados batedores de ondas com absorção activa (*Active Wave Absorber - AWA*), sendo sistemas combinados que, para além de gerarem ondas incidentes, única função dos batedores clássicos, absorvem também as ondas reflectidas pelo modelo em ensaio, estão presentemente a ser desenvolvidos em diversos laboratórios de hidráulica. Seria conveniente adquirir conhecimentos e técnicas para a implementação, nos laboratórios nacionais, destes sistemas. Neste âmbito, a cooperação do LNEC com outros centros de investigação estrangeiros, nomeadamente com a Universidade Politécnica de Valência, em Espanha, será certamente frutuosa.



# PARTE V



# BIBLIOGRAFIA

---

1. **Ahn, K.** (1996) - *The Digital Simulation of Non-Linear Random Waves*. Proc. ICCE 96 - Chap. 52, pp. 657-667.
2. **Aldemira, J. C.; Alvarez J. C.; Nieto G. B.** (1986a) - *Análisis Convencional de un Registro de Oleaje*. MOPU - Publicación No. 10.
3. **Aldemira, J. C.; Alvarez J. C.; Nieto G. B.** (1986b) - *Características Estadístico-Espectrales de una Muestra de Registros de Oleaje*. MOPU - Publicación No. 14.
4. **Barnouin, B.** (1990) - *Practical Wave Modeling*. Kluwer Academic Publishers - Water Wave Kinematics - pp. 201-214.
5. **Battjes, J. A.** (1974) - *Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves*. PhD Thesis, Delft University of Technology.
6. **Battjes, J. A.; Vledder G. P.** (1984) - *Verification of Kimura's Theory for Wave Group Statistics*. Proc. ICCE 84 - Chap. 43, pp. 642-648.
7. **Bendat, J. S.; Piersol A. G.** (1986) - *Random Data. Analysis and Measurement Procedures*. John Wiley & Sons, New York - 2nd Edition - ISBN 0 471 04000 2.
8. **Benjamin, J. R.; Cornell C. A.** (1970) - *Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers*. McGraw-Hill, New York, USA.
9. **Benoît, M.; Allilaire J.** (1996) - *Absorption Active de Houle. Développement Théorique et Mise en Oeuvre de Méthodes Applicables en Canal a Houle*. Direction des Etudes et Recherches - EDF - No. HE-42/95/036/A.
10. **Benoît, M.; Frigaard P.; Schäffer H.** (1997) - *Analyzing Multidirectional Wave Spectra: A Tentative Classification of Available Methods*. Proc. IAHR-Seminar - Multidirectional Waves and their Interaction with Structures - pp. 131-158.
11. **Biéssel, F.; Suquet, F.** (1951) - *Les appareils générateurs de houle en laboratoire*. La Houille Blanche, No. 2, 4, 5.
12. **Black, K. P.** (1978) - *Wave transformation over shallow reef*. Technical report 42, U Hawaii -Look Lab -78-42, University of Hawaii, Hawaii, USA.
13. **Boccotti, P.; Barbaro, G.; Mannino L.** (1992) - *An Experiment at Sea on Mechanics of the Wave Groups*. Proc. ICCE 92 - Chap. 68, pp. 907-917.
14. **Borgman, L. E.** (1969) - *Ocean Wave Simulation for Engineering Design*. Journal of Waterways and Harbours Division, ASCE, Vol. 95, WWS, 6925, pp. 557-583.
15. **Borgman, L. E.** (1980) - *Conditional Simulation of Ocean Wave Properties*. Proc. ICCE 80 - Chap. 18, pp. 318-332.
16. **Borgman, L. E.** (1982) - *Techniques for Computer Simulation of Ocean Waves*. Topics in Ocean Physics, North Holland Pub. Co., 1982, Amsterdam, pp. 387-417.

17. **Borgman, L. E.** (1990) - *Irregular Ocean Waves: Kinematics and Forces*. The Seas, Vol. 9, Ocean engineering Science, Chapter 4, pp 121-168.
18. **Borgman, L. E.; Allender, J.; Krogstad, H.; Barstow, S.; Audunson, T.** (1990) - *Conditional Simulation of Ocean Wave Kinematics and Comparisons with Storm Field Measurements*. Kluwer Academic Publishers - Water Wave Kinematics, pp. 247-263.
19. **Bracewell, R. N.** (1990) - *Numerical Transforms*. Science, Vol. 248, pp. 697-704.
20. **Burcharth, H. F.** (1979) - *The Effect of Wave Grouping on On-Shore Structures*. Coastal Engineering - Vol. 2, pp. 189-199.
21. **Capitão, R. P.; Carvalho, M. M.** (1995) - *Simulação da Agitação Marítima. Separação da agitação incidente e reflectida - Método das duas sondas*. Relatório 349/95-NPP, LNEC, Lisboa.
22. **Capitão, R. P.; Carvalho, M. M.** (1996) - *Simulação da agitação marítima. Agitação incidente e reflectida. Separação pelo método das N sondas*. Relatório 50/96-NPP, LNEC, Lisboa.
23. **Capitão, R. P.; Carvalho, M. M.** (1997a) - *Numerical and Physical Tests on Wave Group Characteristics*. Proc. WAVES 97 - pp. 991-1005.
24. **Capitão, R. P.; Carvalho, M. M.** (1997b) - *Separation of Incident and Reflected Spectra in Wave Flumes*. Proc. Conf. Computer Modelling of Seas and Coastal Regions III - pp. 293-302.
25. **Capitão, R. P.; Carvalho, M. M.** (1997c) - *Simulação da Agitação Marítima - Caracterização de Grupos de Ondas*. Relatório 28/97-NPP, LNEC, Lisboa.
26. **Capitão, R. P.; Carvalho, M. M.** (1999) - *Scaling Wave Groups in Numerically Simulated Wave Records*. Proc. Canadian Coastal Conf. 99 - Vol. 2, pp. 595-609.
27. **Capitão, R. P.; Carvalho, M. M.** (2000a) - *Flume Simulation of Water Surface Profiles Using a General Software Package*. International Conference "Oceans 2000 MTS/IEEE", Providence, RI, USA.
28. **Capitão, R. P.; Carvalho, M. M.** (2000b) - *Simulação da Agitação Marítima - Simulação física de registos de ondas*. Relatório 319/00-NPP, LNEC, Lisboa.
29. **Capitão, R. P.; Pires Silva A. A.; Medina, J. R.; Carvalho M. M.** (1998) - *Extreme Wave Group Statistics of Numerically Simulated Wave Records*. Proc. OMAE 98 - Paper No. OMAE-98-1455.
30. **Capitão, R. P.; Vaz, A.; Carvalho, M. M.** (1998) - *Simulação da Agitação Marítima - Avaliação da reflexão em canais de ondas irregulares - 1º Relatório*. Relatório 193/98-NPP, LNEC, Lisboa.
31. **Carratalá, C.** (1995) - *Evaluación Estadística y Espectral de las Técnicas de Simulación Numérica de Oleaje*. Universidad Politécnica de Valencia - Tesis Doctoral.
32. **Cartwright, D. E.; Longuet-Higgins, M. S.** (1956) - *The statistical distribution of the maxima of a random function*. Proc. R. Soc. London, A, 237, 212.
33. **Carvalho, F. J.; Costa, C. O.; Azevedo, F. S.** (1991) - *Elementos de Sistemas e de Análise e Processamento de Sinais*. Curso de Especialização, LNEC, CPCE - Sebenta de Curso.

- 
34. **Carvalho, F. J.** (1989) - *Engenharia de Sistemas de Controlo. Contribuição para o desenvolvimento das suas aplicações na investigação em domínios da Engenharia Civil*. Memória Nº 742, LNEC, Lisboa.
  35. **Carvalho, M. M.** (1973) - *Simulação da Agitação Irregular - Técnicas Matemáticas*. Tese para Especialista, LNEC, Lisboa.
  36. **Carvalho, M. M.** (1980) - *Processos estocásticos em Hidráulica Marítima*. Seminário 260, LNEC, Lisboa, Julho de 1980.
  37. **Carvalho, M.M.** (1981) - *Modelação estocástica da agitação marítima*. Texto de curso, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
  38. **Carvalho, M. M.** (1989) - *Sea wave simulation*. In "Recent Advances in Hydraulic Physical Modelling", R. Martins Ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 447-502.
  39. **Carvalho, M. M.** (1990) - *Sea Wave Simulation*. Memória LNEC - Hidráulica - No. 748 - ISBN 972-49-1506-9.
  40. **Carvalho, M. M.; Ramos, F. S.; Morais, C. C.** (1970) - *Spectral computations on pressure wave gauge records*. 12th Int. Conf. on Coastal Engineering, Washington, D.C., USA.
  41. **Champeney, D. C.** (1973) - *Fourier Transforms and their Physical Applications*. Academic Press - ISBN 0 12 167450 9.
  42. **Chugani, M. L.; Samant, A. R.; Cerna, M.** (1998) - *LabVIEW Signal Processing*. Prentice Hall PTR - ISBN 0 13 972449 4.
  43. **Collins, J. I.** (1990) - *Groupiness Factor and Wave Height Distribution (Discussion)*. J WPCOE - Vol. 115, No. 1, pp. 519-522.
  44. **Cramér, H.; Leadbetter, M. R.** (1967) - *Stationary and related stochastic processes*. John Wiley and Sons, New York.
  45. **Daemrich, K-F; Eggert, W-D** (1980) - *Investigations on Irregular Waves in Hydraulic Models*. Proc. ICCE 80 - Chap. 10, pp. 186-203.
  46. **Dean, R. G.; Dalrymple, R. A.** (1991) - *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Advanced Series on Ocean Engineering - Vol. 2, World Scientific.
  47. **Duncan, P. E.; Drake, K. R.** (1995) - *A Note on the Simulation and Analysis of Irregular Non-Linear Waves*. Applied Ocean Research - Vol. 17, pp. 1-8.
  48. **Elgar, S.; Guza, R. T.; Seymour, R. J.** (1984) - *Predictions of Wave Group Statistics*. Proc. ICCE 84 - Chap. 52, pp. 770-781.
  49. **Elgar, S.; Guza, R. T.; Seymour, R. J.** (1985) - *Wave Group Statistics From Numerical Simulations of a Random Sea*. Applied Ocean Research - Vol. 7 (2), pp. 93-96.
  50. **Elias, N. P.** (1988) - Comunicação oral.
  51. **Foote, Y.; Huntley, D.; Davidson, M.; Russel, P.; Hardisty, J.; Cramp, A.** (1992) - *Incident Wave Groups and Long Waves in the Nearshore Zone*. Proc. ICCE 92 - Chap. 73, pp. 974-989.
  52. **Frigaard, P.; Brorsen, M.** (1995) - *A Time-Domain Method for Separating Incident and Reflected Irregular Waves*. Coastal Engineering - Vol. 24, pp. 205-215.
-

- 
53. **Frigaard, P.; Christensen, M.** (1994) - *An Absorbing Wave-Maker Based on Digital Filters*. Proc. ICCE 94 - Chap. 13, pp. 168-180.
  54. **Funke, E. R.; Mansard, E. P. D.** (1979) - *On the Synthesis of Realistic Sea States in a Laboratory Flume*. National Research Council, Canada - Report No. LTR-HY-66.
  55. **Funke, E. R.; Mansard, E. P. D.** (1980) - *On the Synthesis of Realistic Sea States*. Proc. ICCE 80 - Chap. 179, pp. 2974-2991.
  56. **Funke, E. R.; Mansard, E. P. D.** (1987) - *A Rationale for the Use of the Deterministic Approach to Laboratory Wave Generation*. National Research Council - Selected Papers on Two-Dimensional Wave Generation and Analysis - pp. 1-44.
  57. **Gaillard, P.; Gauthier, M.; Holly, F.** (1980) - *Method of Analysis of Random Wave Experiments with Reflecting Coastal Structures*. Proc. ICCE 80 - Chap. 11, pp. 204-220.
  58. **Gilbert, G.; Thompson, D. M.; Brewer, A. J.** (1971) - *Design curves for regular and random wave generators*. Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 9, No. 2.
  59. **Giménez, M. H.; Borgman, L. E.; Hudspeth, R. T.; Medina, J. R.; Sánchez-Carratalá, C. R.; Tuah, H.** (1990) - *Conditional Simulation in Laboratory Flumes*. Proc. ICCE 90 - Chap. 19, pp. 255-266.
  60. **Giménez, M. H.; Carratalá, C. S.; Medina, J. R.** (1994) - *Analysis of False Waves in Numerical Sea Simulations*. Ocean Engineering - Vol. 21, No. 8, pp. 751-764.
  61. **Goda, Y.** (1970) - *Numerical Experiments on Wave Statistics with Spectral Simulation*. Report Port and Harbour Research Institute, 9(3), pp. 3-57.
  62. **Goda, Y.** (1976) - *On wave groups*. Paper presented at the 1st Conference on Behaviour of Offshore Structures, (BOSS'76), The Norwegian Institute of Technology.
  63. **Goda, Y.** (1978) - *The Observed Joint Distribution of Periods and Heights of Sea Waves*. Coastal Engineering - pp. 227-246.
  64. **Goda, Y.** (1979) - *A review of statistical interpretation of wave data*. Rep. Port and Harbour Research Institute. Yokosuka, Japan, 18(1), pp. 5-32.
  65. **Goda, Y.** (1985) - *Random Seas and Design of Maritime Structures*. University of Tokyo Press, Japan.
  66. **Goda, Y.; Suzuki, Y.** (1976) - *Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments*. Proceedings of the 15 th. Coastal Engineering Conference, Hawaii, Vol. 1, pp. 828-845.
  67. **Gomes, D.** (1995) - *Estimação do Espectro Direccional da Agitação Marítima*. Anais do Instituto Hidrográfico - No. 13, pp. 41-47.
  68. **Gravesen, H.; Frederiksen, E.; Kirkegaard, J.** (1974) - *Model Tests with Directly Reproduced Nature Wave Trains*. Proc. ICCE 74 - Chap. 20, pp. 372-385.
  69. **Gronbech, J.; Jensen, T.; Andersen, H.** (1996) - *Reflection Analysis with Separation of Cross Modes*. Proc. ICCE 96 - Chap. 76, pp. 968-980.
  70. **Haas, P.; Dingemans, M.; Klopman, G.** (1996) - *Simulation of Propagating Nonlinear Wave Groups*. Proc. ICCE 96 - Chap. 13, pp. 165-174.



- 
71. **Hald, T.; Frigaard, P.** (1997) - *Alternative Method for Active Absorption in Multidirectional Waves*. Proc. IAHR Seminar - Multidirectional Waves and their Interaction with Structures - pp. 183-194.
  72. **Hall, K.** (1994) - *Influence of Wave Groups on Stability of Berm Breakwaters*. J WPCOE - Vol. 120, No. 6, pp. 630-636.
  73. **Haller, M.; Dalrymple, R.** (1995) - *Looking for Wave Groups in the Surf Zone*. Proc. Coastal Dynamics 95 - pp. 81-92.
  74. **Hamilton, J.; Hui, W.; Donelan, M.** (1979) - *A Statistical Model for Groupiness in Wind Waves*. J. Geophysical Research - Vol. 84, No. C8, pp. 4875-4884.
  75. **Harris, D. L.** (1972) - *Characteristics of Wave Records in the Coastal Zone*. Academic Press - Waves on Beaches and Resulting Sediment Transport.
  76. **Hirakuchi, H.; Kajima, R.; Kawaguchi, T.** (1990) - *Application of a Piston-Type Absorbing Wavemaker to Irregular Wave Experiments*. Coastal Engineering in Japan - Vol. 33, pp. 11-24.
  77. **Hirakuchi, H.; Kajima, R.; Shimizu, T.; Ikeno, M.** (1992) - *Characteristics of Absorbing Directional Wavemaker*. Proc. ICCE 92 - Chap. 20, pp. 281-294.
  78. **Hudspeth, R. T.; Medina, J. R.** (1988) - *Wave Group Analyses by the Hilbert Transform*. Proc. ICCE 88 - Chap. 66, pp. 884-898.
  79. **Hughes, S. A.** (1993) - *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 7, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.
  80. **Huntley, D. A.; Simmonds, D. J.; Davidson, M. A.** (1995) - *Estimation of Frequency-Dependent Reflection Coefficients Using Current and Elevation Sensors*. Proc. Coastal Dynamics 95 - pp. 57-68.
  81. **IAHR Working Group** (1989) - *List of Sea-State Parameters*. J WPCOE - Vol. 115, No. 6, pp. 793-808.
  82. **Isaacson, M.; Papps, D.; Mansard, E. P. D.** (1996) - *Oblique Reflection Characteristics of Rubble-Mound Structures*. J WPCOE - Vol. 122, No. 1, Paper No. 9715.
  83. **Ito, K.; Katsui, H.; Mochizuki, M.; Isobe, M.** (1996) - *Non-Reflected Multi-Directional Wave Maker Theory and Experiments of Verification*. Proc. ICCE 96 - Chap. 35, pp. 443-456.
  84. **Jamieson, W. W.; Mansard, E. P. D.** (1987) - *An Efficient Upright Wave Absorber*. Proc. Coastal Hydrodynamics - pp. 124-139.
  85. **Jayewardene, I.; Haradasa, J.; Tainsh, J.** (1993) - *Analysis of Wave Groupiness*. Proc. Coasts 93 - NCP No. 93/4, Vol. 1, pp. 99-103.
  86. **Johnson, R. R.; Mansard, E. P. D.; Ploeg, J.** (1978) - *Effects of Wave Grouping on Breakwater Stability*. Proc. ICCE 78 - pp. 2228-2243.
  87. **Kamphuis, J. W.** (2000) - *Introduction to Coastal Engineering and Management*. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 16, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.
  88. **Kimura, A.** (1980) - *Statistical Properties of Random Wave Groups*. Proc. ICCE 80 - Chap. 178, pp. 2955-2973.

- 
89. **Kimura, A.** (1985) - *The Decomposition of Incident and Reflected Random Wave Envelopes*. Coastal Engineering in Japan - Vol. 28, pp. 60-69.
  90. **Kimura, A.** (1988) - *Statistical properties of the maximum run of irregular sea waves*. Proc. 21st ICCE, Malaga, pp. 655-656.
  91. **Kondo, K.; Sekimoto, T.; Shimizu, T.; Imai, S.** (1992) - *Occurrence Distribution of Maximum Wave Height Including Wave Grouping Effect*. Proc. ICCE 92 - Chap. 67, pp. 894-906.
  92. **Kopenhagen, R. S.; Gerdes, M.; Tautenhain, E.; Grüne, J.** (1997) - *Online Absorption Control System for Wave Generation*. Proc. WAVES 97 - Vol. 2, pp. 1295-1305.
  93. **LabVIEW** (1998, 2000) - *LabVIEW Manuals*. National Instruments Corporation - Vol. 1-5.
  94. **Liu, L.; Elgar, S.; Guza, R. T.** (1993) - *Groups of Ocean Waves: Linear Theory, Approximations to Linear Theory, and Observations*. J WPCOE - Vol. 119, No. 2, pp. 144-159.
  95. **Longuet-Higgins, M. S.** (1952) - *On the statistical distributions of the heights of the sea waves*. Journal Marine Research, Vol. IX, No. 3, pp. 245-266.
  96. **Longuet-Higgins, M. S.** (1984) - *Statistical properties of wave groups in a random sea state*. Philos. Trans. R. Soc. London, A, 312, pp. 219-250.
  97. **Loureiro, A. M.** (1986) - *Análisis de la Formación de Grupos de Olas*. MOPU - Publicación No. 9.
  98. **Loureiro, A. M.** (1988) - *Formación de Grupos de Oleaje en las Costas Españolas*. MOPU - Publicación No. 30.
  99. **Loureiro, A. M.; Alvarez, J. C.** (1986) - *Análisis Espectral de Máxima Entropía de Registros de Oleaje. Estudio Comparativo*. MOPU - Publicación No. 13.
  100. **Maisondieu, C.** (1996) - *Étude sur la génération d'ondes transitoires de grande amplitude*. Centre d'Hydraulique Canadien, Laboratoire de Mécanique de Fluides de L'Ecole Centrale de Nantes - Document provisoire de travail.
  101. **Mansard, E. P. D.; Funke, E. R.** (1980) - *The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a Least Squares Method*. Proc. ICCE 80 - Chap. 8, pp. 154-172.
  102. **Mansard, E. P. D.; Funke, E. R.** (1986) - *A Comprehensive Wave Data Analysis Package*. National Research Council - Selected Papers on Two-Dimensional Wave Generation and Analysis - pp. 108-128.
  103. **Mansard, E. P. D.; Funke, E. R.** (1987) - *On the Reflection Analysis of Irregular Waves*. National Research Council, Canada - No. 1987/02 - TR-HY-017.
  104. **Mansard, E. P. D.; Funke, E. R.** (1988) - *Physical Experiments in Laboratories: Contrast of Methodologies and Results*. Short Course on Planning and Designing Maritime Structures, Malaga - Technical Report.
  105. **Mansard, E. P. D.; Funke, E. R.** (1990) - *On the Fitting of JONSWAP Spectra to Measured Sea States*. Proc. ICCE 90 - Chap. 36, pp. 464-477.
  106. **Mansard, E. P. D.; Sand, S. E.** (1994) - *A Comparative Evaluation of Wave Grouping Measures*. National Research Council, Canada; Proc. ICCE 94 - No. IR-1995-01; Chap. 61, pp. 832-846.

- 
107. **Mase, H.** (1989) - *Groupiness Factor and Wave Height Distribution*. J WPCOE - Vol. 115, No. 1, pp. 105-121.
108. **Mase, H.; Kita, N.; Iwagaki, Y.** (1983) - *Random Wave Simulation Considering Wave Groups*. Coastal Engineering in Japan - Vol. 26, pp. 61-75.
109. **Mase, H.; Yamashita, T.; Hayashi, K.** (1990) - *Wave Group Properties of Coastal Waves*. Proc. ICCE 90 - Chap. 13, pp. 177-190.
110. **Masson, D.; Chandler, P.** (1993) - *Wave Groups: A Closer Look at Spectral Methods*. Coastal Engineering - pp. 249-275.
111. **Matsumoto, A.; Hanzawa, M.** (1996) - *New Optimization Method for Paddle Motion of Multi-Directional Wavemaker*. Proc. ICCE 96 - Chap. 38, pp. 479-492.
112. **McClellan, J. H.; Parks, T. W.; Rabiner, L. R.** (1979) - *FIR linear phase filter design program*. Programs for Digital Signal Processing, IEEE Press, John Wiley, NY, pp. 5.1.1-5.1.6.
113. **Medina, J. R.** (1992) - *A Robust Armor Design to Face Uncertainties*. Proc. ICCE 92 - Chap. 105, pp. 1371-1384.
114. **Medina, J. R.** (1992) - *La Consideración de los Grupos de Olas en el Diseño de Diques en Talud*. I Jornadas Españolas de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, Santander - Technical Report.
115. **Medina, J. R.** (2001) - *Estimation of Incident and Reflected Waves Using Simulated Annealing*. JWPCOE, ASCE, Vol. 127, No. 4, pp. 213-221.
116. **Medina, J. R.; Aguilar, J.; Diez, J. J.** (1985) - *Distortions Associated with Random Sea Simulators*. J WPCOE - Vol. 111, No. 4, pp. 603-628.
117. **Medina, J. R.; Fassardi, C.; Hudspeth, R. T.** (1990) - *Effects of Wave Groups on the Stability of Rubble Mound Breakwaters*. Proc. ICCE 90 - Chap. 116, pp. 1552-1563.
118. **Medina, J. R.; Hudspeth, R. T.** (1987) - *Sea states defined by wave height and period functions*. Proc. IAHR Seminar on wave analysis and generation in laboratory basins, 22<sup>nd</sup> IAHR Congress, Lausanne, pp. 249-259.
119. **Medina, J. R.; Hudspeth, R. T.** (1990) - *A Review of the Analyses of Ocean Wave Groups*. Coastal Engineering - Vol. 14, pp. 515-542.
120. **Medina, J. R.; Hudspeth, R. T.; Fassardi, C.** (1994) - *Breakwater Armor Damage Due to Wave Groups*. J WPCOE - Vol. 120, No. 2, pp. 179-198.
121. **Miles, M. D.; Laurich, P. H.; Funke, E. R.** (1989) - *A Multi-Mode Segmented Wave Generator for the NRC Hydraulics Laboratory*. National Research Council, Canada - Technical Report.
122. **Mizuguchi, M.** (1990) - *Note on a Method to Separate Incident and Reflected Waves*. Coastal Engineering in Japan - Vol. 33, pp. 114-117.
123. **Moraes, C. C.** (1971) - *Reflexão de ondas de oscilação*. Tese para Especialista, LNEC, Lisboa.
124. **Morden, D. B.** (1976) - *Decomposition of co-existing random wave energy*. Proceedings of the 15<sup>th</sup> Coastal Engineering Conference, Hawaii.
125. **Mota Oliveira, I. B.** (1985) - *Hidráulica marítima*. Instituto Superior Técnico, AEIST, Lisboa.
-

- 
126. **Nakamura, S.** (1996) - *Estimation of Wave Groups Parameter from Wave Climate Statistics*. Proc. ICCE 96 - Chap. 117, pp. 1503-1514.
127. **Nakamura, S.; Katoh, K.** (1992) - *Generation of Infragravity Waves in Breaking Process of Wave Groups*. Proc. ICCE 92 - Chap. 74, pp. 990-1003.
128. **Nelson, R. C.** (1987) - *Wave groups – The length of a piece of string*. Proc. 8<sup>th</sup> Australasian Conf. On Coastal and Ocean Eng., Launceston, 1-4.
129. **Newland, D. E.** (1975) - *An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis*. Longman Text - ISBN 0 582 46335 1.
130. **Nolte, K. G.; Hsu, F. H.** (1972) - *Statistics of ocean wave groups*. Proc. Offshore Technology Conf., pp. 637-644.
131. **Nolte, K. G.; Hsu, F. H.** (1979) - *Statistics of Larger Waves in a Sea State*. J WPCOE - pp. 389-403.
132. **Papoulis, A.** (1965) - *Probability, random variables, and stochastic processes*. McGraw-Hill Book Co., New York.
133. **Parzen, E.** (1964) - *Stochastic Processes*. Holden-Day Series in Probability and Statistics, Inc., San Francisco.
134. **Pierson, W. J.; Moskowitz, L.** (1964) - *A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii*. Journal of Geophysical Research, 69(24), pp. 5181-5190.
135. **Pires Silva, A. A.** (1991) - *Estudo das Características Espectrais da Agitação Marítima na Costa Oeste Portuguesa*. Revista Recursos Hídricos - APRH - Vol. 13, pp. 55-64.
136. **Pires Silva, A. A.** (1995) - *Ondas de superfície geradas pelo vento. Um novo critério de definição*. Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
137. **Pires Silva, A. A.; Medina, J. R.** (1994) - *False Waves in Wave Records*. Ocean Engineering - Vol. 21, No. 8, pp. 765-770.
138. **Pires Silva, A. A.; Medina, J. R.** (1997) - *The Orbital Criterion of Defining Discrete Waves and its Relationship with Sea Wave Periods*. Proc. WAVES 97 - Vol. 1, pp. 122-136.
139. **Ploeg, J.; Funke, E. R.** (1980) - *A Survey of "Random" Wave Generation Techniques*. Proc. ICCE 80 - Chap. 7, pp. 135-153.
140. **Price, W. G.; Bishop, R. E. D.** (1974) - *Probabilistic Theory of Ship Dynamics*. Chapman and Hall - ISBN 0 412 12430 0.
141. **Rice, S. O.** (1954) - *Mathematical Analysis of Random Noise*, 1944, reprinted in *Selected Papers on Noise and Stochastic Processes*. Dover Pub. Inc., pp. 133-294.
142. **Rodríguez, G. R.** (1995) - *Análisis de las ondas gravitatorias generadas por el viento en aguas profundas. Metodología, consideraciones teóricas y evidencias experimentales*. Tesis doctoral, Universidad de Las Palmas de G. C..
143. **Rubí, J. J. C.** (1986) - *Temas de Procesos Estocásticos y Análisis Espectral*. MOPU - Publicación No. 15.
144. **Rye, H.** (1974) - *Wave group formation among storm waves*. Proc. ICCE, pp. 764-783.
-

- 
145. **Schäffer, H.; Klopman, G.** (1997) - *Review of Multidirectional Active Wave Absorption Methods*. Proc. IAHR Seminar - Multidirectional Waves and their Interaction with Structures - pp. 159-181.
146. **Schäffer, H.; Klopman, G.** (2000) - *Review of Multidirectional Active Wave Absorption Methods*. J WPCOE - Vol. 126, No. 2, pp. 88-97.
147. **Schäffer, H.; Skourup, J.** (1996) - *Active Absorption of Multidirectional Waves*. Proc. ICCE 96 - Chap. 5, pp. 55-66.
148. **Sobey, R. J.; Read, W. W.** (1984) - *Wave Groups in the Frequency and Time Domains*. Proc. ICCE 84 - Chap. 47, pp. 695-707.
149. **Sorensen, R. M.** (1993) - *Basic wave mechanics for coastal and ocean engineers*. John Wiley & Sons, New York.
150. **Spanos, P. D.; Mignolet, M. P.** (1990) - *Simulation of Stationary Random Processes: Two-Stage MA to ARMA Approach*. J WPCOE - Vol. 116, No. 3, pp. 620-641.
151. **Stam, C. J.** (1988) - *The correlation parameter in the bi-variate Rayleigh probability density function of succeeding wave heights, a comparison of computation methods*. Report M1983/H198, Delft.
152. **Stansberg, C. T.** (1990) - *Extreme Waves in Laboratory Generated Irregular Wave Trains*. Kluwer Academic Publishers - Water Wave Kinematics - pp. 573-589.
153. **Sutherland, J.; Greated, C. A.** (1995) - *Variations in the Crest Kinematics of Wave Groups*. Applied Ocean Research - Vol. 17, pp. 55-62.
154. **Takahashi, S.; Yamamoto, S.; Miura, H.** (1994) - *Fundamental Characteristics of a New Wave Absorbing System Using Sand Liquefaction*. Proc. ICCE 94 - Chap. 195, pp. 2698-2711.
155. **Tanaka, M.; Ohyama, T.; Kiyokawa, T.; Nadaoka, K.** (1994) - *Non-Reflective Multi-Directional Wave Generation by Source Method*. Proc. ICCE 94 - Chap. 48, pp. 650-664.
156. **Tayfun, M. A.; Lo, J-M** (1989a) - *Envelope, Phase, and Narrow-Band Models of Sea Waves*. J WPCOE - Vol. 115, No. 5, pp. 594-613.
157. **Tayfun, M. A.; Lo, J-M** (1989b) - *Wave Envelope and Related Spectra*. J WPCOE - Vol. 115, No. 4, pp. 515-533.
158. **Teisson, C.; Benoit, M.** (1994) - *Laboratory Measurement of Oblique Irregular Wave Reflection on Rubble-Mound Breakwaters*. Proc. ICCE 94 - Chap. 116, pp. 1610-1624.
159. **Thompson, E. F.; Oliver, J.** (1994) - *Wave Grouping in Locally Generated Seas on Short Fetches*. J WPCOE - Vol. 120, No. 2, pp. 220-225.
160. **Thornton, E. B.; Calhoun, R. J.** (1972) - *Spectral Resolution of Breakwater Reflected Waves*. J WPCOE, ASCE - Vol. 98, WW4, pp. 443-460.
161. **Tuah, H.; Hudspeth, R. T.** (1982) - *Comparisons of numerical random sea simulations*. J WPCOE, ASCE - Vol. 108, WW4, pp. 569-584.
162. **Tucker, M. J.** (1991) - *Waves in Ocean Engineering - Measurement, Analysis, Interpretation*. Ellis Horwood Series in Marine Science - ISBN 0 13 932955 2.
-

- 
163. **Tucker, M. J.; Challenor, P. G.; Carter, D. J.** (1984) - *Numerical Simulation of a Random Sea: A Common Error and its Effect Upon Wave Group Statistics*. Applied Ocean Research - Vol. 6, No. 2, pp. 118-122.
164. **Vanhoff, B.; Elgar, S.; Guza, R. T.** (1997) - *Numerically Simulating Non-Gaussian Sea Surfaces*. J WPCOE - Vol. 123, No. 2, pp. 68-72.
165. **Vledder, G. P.** (1983) - *Verification of Kimura model for the description of wave groups*. Report R/1983/6/H, Delft University of Technology.
166. **Vledder, G. P.** (1992) - *Statistics of Wave Groups Parameters*. Proc. ICCE 92 - Chap. 71, pp. 946-959.
167. **Vledder, G. P.; Battjes, J. A.** (1992) - *Discussion of "List of sea-state parameters"*. JWPCOE, 118(2), pp. 226-230.
168. **Wells, L. K.; Travis, J.** (1998) - *LabVIEW for Everyone*. Prentice Hall PTR - ISBN 0 13 268194 3.
169. **Yang, J. N.** (1972) - *Simulation of Random Envelope Processes*. Journal of Sound and Vibration - Vol. 21, No. 1, pp. 73-85.
170. **Yasuda, T.; Shinoda, S.; Hattori, T.** (1994) - *Soliton-Mode Wavemaker Theory and System for Coastal Waters*. Proc. ICCE 94 - Chap. 52, pp. 704-718.
171. **Yim, J. Z.; Chou, C. R.; Lai, M. Y.** (1995) - *Simulating Nature Wind Waves in a Wave Flume*. Proc. Coastal Dynamics 95 - pp. 45-56.
172. **Yim, J. Z.; Lai, M. Y.** (1996) - *Influences of Spectral Shapes on the Statistical Properties of Simulated Random Waves*. Proc. ICCE 96 - Chap. 72, pp. 914-926.
173. **Yokoki, H.; Isobe, M.** (1996) - *A Method for Estimating Directional Spectra in a Field of Incident and Reflected Waves*. Proc. ICCE 96 - Chap. 4, pp. 43-54.
174. **Yokoki, H.; Isobe, M.; Watanabe, A.** (1992) - *A Method for Estimating Reflection Coefficient in Short-Crested Random Seas*. Proc. ICCE 92 - Chap. 57, pp. 765-776.
175. **Yokoki, H.; Isobe, M.; Watanabe, A.** (1994) - *On a Method for Estimating Reflection Coefficient in Short-Crested Random Seas*. Proc. ICCE 94 - Chap. 53, pp. 719-730.
176. **Yu, K.** (1992) - *Probabilistic Structure of Random Wave Groups*. Proc. ICCE 92 - Chap. 70, pp. 932-945.
177. **Yu, Y.; Liu, S.** (1990) - *The Group Characteristics of Sea Waves*. Proc. ICCE 90 - Chap. 6, pp. 82-94.
178. **Zelt, J. A.; Skjelbreia, J. E.** (1992) - *Estimating Incident and Reflected Wave Fields Using an Arbitrary Number of Wave Gauges*. Proc. ICCE 92 - Chap. 58, pp. 777-789.

# ANEXOS

---

|  |     |
|--|-----|
| ANEXO 1 - FERRAMENTAS MATEMÁTICAS.....                                 | 265 |
| Funções periódicas.....  | 267 |
| Séries de Fourier .....  | 267 |
| Relação entre parâmetros de várias representações de Fourier.....      | 269 |
| Transformada de Hilbert .....  | 271 |
| ANEXO 2 - DEFINIÇÃO DE ESPECTROS EMPÍRICOS.....                        | 273 |
| Introdução.....  | 275 |
| Pierson-Moskowitz .....  | 275 |
| Pierson-Moskowitz (ITTC) .....   | 275 |
| Pierson-Moskowitz Generalizado .....                                   | 276 |
| JONSWAP .....  | 276 |
| ANEXO 3 - DEDUÇÕES MATEMÁTICAS .....                                   | 279 |
| Densidade Bivariada de Rayleigh.....                                   | 281 |
| Fórmulas de Longuet-Higgins .....                                      | 282 |
| Distribuição Exponencial com base no PE de Poisson.....                | 283 |
| Obtenção da Fase da Onda Reflectida .....                              | 284 |
| ANEXO 4 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....                                      | 289 |
| Extracto dos Resultados dos exemplos numéricos - SIMCOND .....         | 291 |
| Cálculos de Reflexão – Simulação Numérica - Método das 2 Sondas .....  | 292 |
| Cálculos de Reflexão – Simulação Numérica - Método das $M$ sondas..... | 293 |
| ANEXO 5 - SIMULAÇÃO FÍSICA .....                                       | 295 |
| Cálculos de Reflexão – Simulação Física - Método das 2 Sondas .....    | 297 |
| Cálculos de Reflexão – Simulação Física - Método das $M$ sondas .....  | 298 |

ANEXO 6 - LISTA DE MÓDULOS E ROTINAS SAM ..... 299

    Introdução..... 301

    Legenda ..... 301



## **ANEXO 1 - FERRAMENTAS MATEMÁTICAS**



## FUNÇÕES PERIÓDICAS

Dada uma função qualquer,  $F(t)$ , definida num intervalo  $[0, T]$ , é possível, nesse intervalo, decompô-la em soma de sinusóides, tais que a de maior período tem período igual a  $T$  e as outras têm períodos  $T/2, T/3, T/4, \dots$ . Essa soma de sinusóides representa em  $[-', +']$  uma função periódica de período  $T$ .

Se se tiver duas funções,  $F_1(t)$  e  $F_2(t)$ , periódicas, com períodos  $T_1$  e  $T_2$ , respectivamente, então a função soma  $F(t) = F_1(t) + F_2(t)$  é periódica e tem por período,  $T$ , o *menor múltiplo comum* de  $T_1$  e  $T_2$ , sendo, portanto,

$$T = k_1 T_1 = k_2 T_2$$

Realmente,

$$F(t+T) = F_1(t+T) + F_2(t+T) = F_1(t+k_1 T_1) + F_2(t+k_2 T_2) = F_1(t) + F_2(t) = F(t)$$

## SÉRIES DE FOURIER

As *séries de Fourier* são um caso particular das Transformadas de Fourier (TF). Estas séries são utilizadas quando se pretende decompor uma dada *função periódica*, de período  $T$ , em componentes, ditas harmónicas. A soma dessas componentes, expressas sob a forma de *coeficientes de Fourier* obtidos da *análise harmónica*, fornece o sinal original.

Chama-se *análise harmónica* de uma função à determinação das constantes que figuram na série de Fourier que a representa num dado intervalo  $[0, T]$ . Chama-se *análise harmónica discreta* à análise harmónica de uma função de que se conhece apenas um conjunto finito de valores relativos a pontos igualmente espaçados nesse intervalo.

Considere-se, então, uma função,  $F(t)$ , representada, no intervalo  $[0, T]$ , por uma das seguintes formas de representação de Fourier:

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(2\pi \frac{n}{T} t\right) + b_n \sin\left(2\pi \frac{n}{T} t\right) \right] \quad (a_n, b_n, \text{ números reais}) \quad (\text{A-1})$$

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} s_n \sin\left(2\pi \frac{n}{T} t + \sigma_n\right) \quad (s_n, \sigma_n, \text{ números reais}) \quad (\text{A-2})$$

$$F(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n e^{i 2\pi \frac{n}{T} t} \quad (A_n, \text{ número complexo}) \quad (\text{A-3})$$

$$F(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} d_n e^{i\left(2\pi \frac{n}{T} t + \beta_n\right)} \quad (d_n, \beta_n, \text{ números reais}) \quad (\text{A-4})$$

A análise harmónica de  $F(t)$  relativamente ao intervalo  $[0, T]$  consiste no cálculo dos coeficientes de uma das fórmulas A-1 a A-4. Se se utilizar, por exemplo, a Eq. (A-3), devem-se calcular os coeficientes complexos

$$A_n = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) e^{-i 2\pi \frac{n}{T} t} dt \quad (\text{A-5})$$

ou, equivalentemente, as constantes que figuram nas outras formas da série de Fourier, Eqs. (A-1), (A-2) ou (A-4) apresentadas acima.

Se, de  $F(t)$ , só se dispõe do conjunto de  $N$  valores

$$\{ F(\Delta t), F(2\Delta t), \dots, F(N\Delta t) \} = \{ F_k \}_{k=1, 2, \dots, N} \quad (\text{A-6})$$

com

$$T = N \Delta t \quad \text{e} \quad t = k \Delta t \quad (\text{A-7})$$

designa-se por  $\tilde{A}_n$  o valor que se obtém aproximando a Eq. (A-5) por um somatório

$$\tilde{A}_n = \Delta t \frac{1}{N\Delta t} \sum_{k=1}^N F(k\Delta t) e^{i 2\pi \frac{n}{N\Delta t} k\Delta t} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N F(k\Delta t) e^{i 2\pi \frac{n}{N} k} \quad (\text{A-8})$$

ou seja,

$$\tilde{A}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N F_k e^{i \frac{2\pi}{N} nk} \quad (\text{A-9})$$

Prova-se (Carvalho, 1973) que

$$A_n = \tilde{A}_n \quad \text{para} \quad \left| \frac{n}{T} \right| \leq \frac{1}{2 \Delta t} \quad \text{ou} \quad |n| \leq \frac{N}{2} \quad (\text{A-10})$$

$$A_n = 0 \quad \text{para} \quad |n| > \frac{N}{2} \quad (\text{A-11})$$

Isto é, quando se cumpre a condição da Eq. (A-10), não há sobreposição em  $\left( -\frac{1}{2\Delta t}, \frac{1}{2\Delta t} \right)$  e a Eq.

(A-9) permite, assim, o cálculo exacto de  $\{ \tilde{A}_n \}$ . Na prática, desde que se escolha um valor de  $\Delta t$  suficientemente pequeno, pode evitar-se a sobreposição ou torná-la insignificante.

O valor  $\frac{1}{2 \Delta t}$  é conhecido por *frequência de Nyquist*. Deste modo, de acordo com as Eqs. (A-10) e

(A-11), o cálculo dos coeficientes  $\{ A_n \} = \{ \tilde{A}_n \}$  deve fazer-se apenas para  $n \leq \frac{N}{2}$ .

## RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DE VÁRIAS REPRESENTAÇÕES DE FOURIER

### I. Relação entre (A-1) e (A-2):

Desenvolvendo a Eq. (A-2) e comparando o resultado com a Eq. (A-1), obtém-se:

$$a_n = s_n \sin g_n$$

$$b_n = s_n \cos g_n$$

ou seja,

$$a_n^2 + b_n^2 = s_n^2$$

$$a_n/b_n = \tan g_n$$

### II. Relação entre (A-1) e (A-3)

De Carvalho, 1973 e de Champeney, 1973, retiram-se as seguintes relações:

$$A_n = (a_n - i b_n) / 2 \qquad |A_n|^2 = \frac{1}{4}(a_n^2 + b_n^2)$$

$$|A_n| = |A_{-n}|$$

$$A_{-n} = (a_n + i b_n) / 2 \qquad |A_{-n}|^2 = \frac{1}{4}(a_n^2 + b_n^2)$$

e, ainda,

$$2 |A_n| = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

Também,

$$a_n = 2 \operatorname{Re} (A_n) = 2 \operatorname{Re} (A_{-n})$$

$$a_{-n} = 2 \operatorname{Re} (A_{-n}) = 2 \operatorname{Re} (A_n) = a_n$$

$$b_n = -2 \operatorname{Im} (A_n) = 2 \operatorname{Im} (A_{-n})$$

$$b_{-n} = -2 \operatorname{Im} (A_{-n}) = -b_n$$

Daqui obtém-se

$$V_{-n} = -\arctan (b_{-n}/a_{-n}) = -\arctan (-b_n/a_n) = \arctan (b_n/a_n) = -V_n \qquad (\text{A-12})$$

### III. Relação entre (A-1) e (A-4):

$$A_n = d_n e^{i\beta_n} = d_n \cos V_n + i d_n \sin V_n$$

ou seja

$$a_n/2 = d_n \cos V_n$$

$$-b_n/2 = d_n \sin V_n$$

e, por isso,

$$V_n = -\arctan(b_n/a_n)$$

$$d_n = \frac{1}{2}\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

#### IV. Relação entre (A-2) e (A-3) :

Tem-se, de I. e II.,

$$s_n^2 = a_n^2 + b_n^2 = 4|A_n|^2$$

logo

$$s_n = 2|A_n|$$

Tem-se, de (A-4),

$$V_n = \arg(A_n)$$

Por outro lado, de III., tem-se

$$-\tan V_n = (b_n/a_n)$$

ou seja,

$$-\cot V_n = (a_n/b_n)$$

o que, por I., dá

$$-\cot V_n = \tan \sigma_n$$

ou seja,

$$\sigma_n = V_n - \frac{\pi}{2} = \arg(A_n) - \frac{\pi}{2}$$

#### V. Relação entre (A-2) e (A-4) :

De I. e III., tira-se facilmente

$$s_n = 2 d_n$$

$$\text{I. : } a_n^2 + b_n^2 = s_n^2 \quad s_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\text{III. : } d_n = \frac{1}{2}\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

Como se viu em IV.,

$$-\cot V_n = \tan \sigma_n$$

donde se conclui

$$g_n = V_n - d/2$$

**VI. Relação entre (A-3) e (A-4) :**

Já se viu que

$$A_n = d_n e^{i\beta_n} = d_n \cos V_n + i d_n \sin V_n$$

e

$$|A_n| = |A_{-n}|$$

Logo,

$$|A_n| = d_n$$

$$d_n = d_{-n} \tag{A-13}$$

**TRANSFORMADA DE HILBERT**

Define-se *Transformada de Hilbert (TH)*,  $\hat{X}(t)$ , de uma função real  $X(t)$  como

$$\hat{X}(t) = TH[X(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{X(\tau)}{t - \tau} d\tau = X(t) \otimes \frac{1}{\pi t} \tag{A-14}$$

onde o sinal  $\otimes$  significa convolução. É fácil de ver que esta transformação é linear.

Uma das propriedades interessantes da TH é que, em virtude dessa transformação, os cosenos passam a senos e os senos passam a cosenos com mudança de sinal, isto é:

$$TH[ a \cos U ] = a \sin U$$

$$TH[ a \sin U ] = - a \cos U$$

e, conseqüentemente,

$$TH \left[ \sum_i a_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \right] = \sum_i a_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \tag{A-15}$$

Por outro lado

$$X(t) = - TH[ \hat{X}(t) ]$$

Assim, a fórmula da inversão da transformada TH é dada por:

$$X(t) = TH^{-1}[\hat{X}(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\hat{X}(\tau)}{\tau - t} d\tau \quad (\text{A-16})$$



## **ANEXO 2 - DEFINIÇÃO DE ESPECTROS EMPÍRICOS**



## INTRODUÇÃO

Neste anexo, apresentam-se as definições dos espectros empíricos mais conhecidos em hidráulica marítima. Estes espectros caracterizam-se por serem funções contínuas com um máximo, apesar de haver também espectros empíricos com mais do que um máximo (espectros multi-modais). Por exemplo, quando num dado ponto coexistem agitação gerada localmente pelo vento (*wind waves*) e ondulação produzida por ventos distantes (*swell*), é frequente que o espectro do registo das elevações da superfície nesse ponto tenha dois picos, referentes às frequências representativas desses dois tipos de ondas.

As formulações empíricas apresentadas a seguir reportam-se a espectros utilizados ao longo deste trabalho. Trata-se de um pequeno conjunto da totalidade das formulações teóricas e empíricas existentes. Apesar de o pacote de *software SAM*, descrito na Parte III, apenas conter o conjunto referido, é de notar que a qualquer momento se poderá complementar esse conjunto com outras quaisquer formulações, bastando, para isso, adicionar novo código ao módulo **SAM MOD 9-1 (Criação de Espectro Empírico)**.

## PIERSON-MOSKOWITZ

Pierson e Moskowitz, 1964, propuseram uma forma espectral que se tornou bastante conhecida, baseando-se em espectros médios de ondulação de estados de mar completamente desenvolvidos. Esta forma espectral de Pierson-Moskowitz apresenta como único parâmetro a velocidade do vento num ponto 19.5 m acima da superfície do mar,  $U_{19.5}$ .

$$S(f) = \frac{\alpha_p g^2}{(2\pi)^4} f^{-5} e^{-0.74 \left( \frac{2\pi U_{19.5} f}{g} \right)^4} \quad (\text{A-17})$$

sendo

- $\alpha_p$  - a constante de Phillips:  $\alpha_p = 0.0081$ ;
- $g$  - a aceleração da gravidade:  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ .

## PIERSON-MOSKOWITZ (ITTC)

A fórmula apresentada para o espectro de Pierson-Moskowitz, Eq. (A-17), pode ser reformulada se se utilizar a relação entre  $H_S$ , a altura significativa, e  $m_0$ , o momento de ordem zero do espectro,  $H_S = 4\sqrt{m_0}$ , da seguinte forma:

$$S(f) = \frac{\alpha_p g^2}{(2\pi)^4} f^{-5} e^{-\frac{4\alpha_p g^2 f^4}{(2\pi)^4 H_S^2}} \quad (\text{A-18})$$

Este espectro empírico, que depende, assim, também de um único parâmetro: a altura significativa, adquiriu o nome de Pierson-Moskowitz ITTC por ter sido proposto pela "International Towing Tank Conference", ITTC em 1972 (Carratalá, 1995).

## PIERSON-MOSKOWITZ GENERALIZADO

Por forma a possibilitar uma maior flexibilidade na definição da forma do espectro, de acordo com parâmetros calculados de observações reais, foram sugeridas outras fórmulas de espectros tendo como base a forma do espectro de Pierson-Moskowitz. Uma delas, de grande popularidade, é a chamada formulação de Pierson-Moskowitz Generalizada de dois parâmetros. Depois de efectuada a parametrização da Eq. (A-17), em função do período de pico,  $T_p$ , e da altura significativa,  $H_S$  (ou, o que é o mesmo, do momento de ordem zero,  $m_0$ ), chega-se à seguinte expressão:

$$S(f) = \frac{5}{16} H_S^2 T_p^{-4} f^{-5} e^{-\left(\frac{5}{4} T_p^{-4} f^{-4}\right)} \quad (\text{A-19})$$

## JONSWAP

Um dos espectros empíricos mais conhecidos, e utilizado frequentemente ao longo deste trabalho, é o chamado espectro de JONSWAP (acrónimo de *JOint North Sea WAve Project*), dado pela seguinte expressão:

$$S(f) = \alpha H_S^2 f_p^4 f^{-5} \exp\left[-(5/4) \cdot (f_p/f)^4\right] \gamma^{\exp\left\{-\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right\}} \quad (\text{A-20})$$

onde:

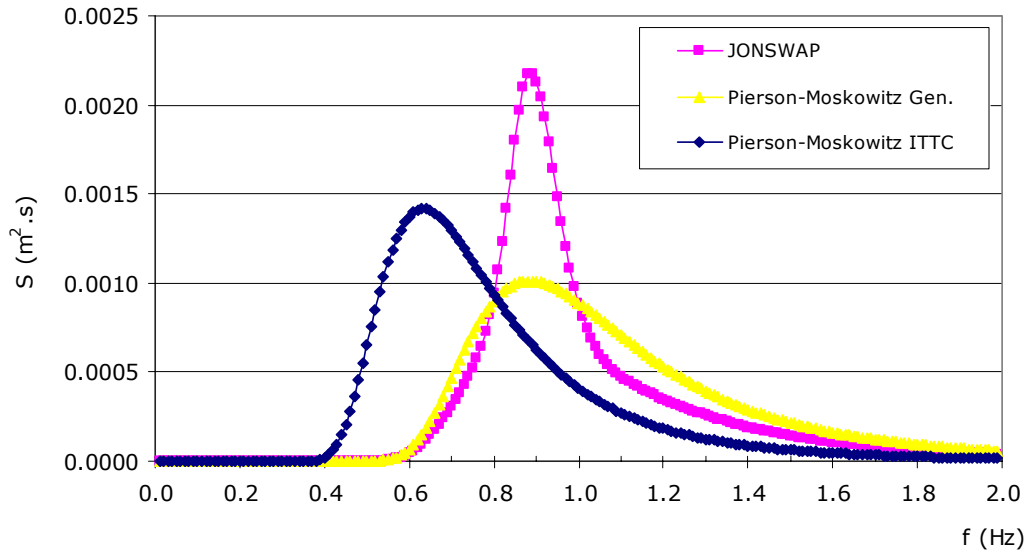
$$\alpha = \frac{0.06238}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \quad (\text{A-21})$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f < f_p \\ 0.09 & f > f_p \end{cases} \quad (\text{A-22})$$

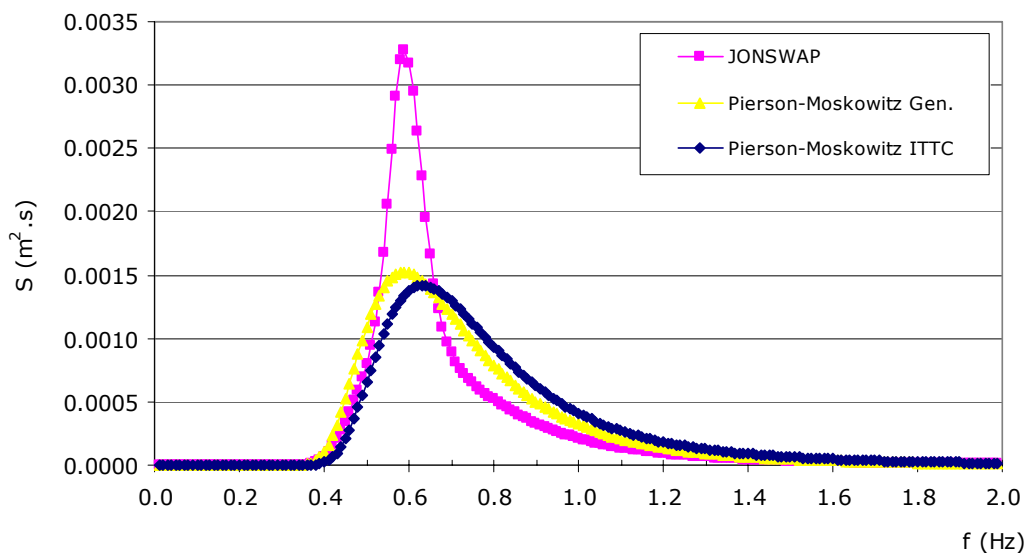
$\gamma$  é um *parâmetro de largura espectral (spectrum width parameter)* de JONSWAP. Este parâmetro, também designado por *factor de reforço do pico do espectro*, toma geralmente valores entre 1 e 7 (com valor médio de 3.3) e controla a esbelteza do espectro.

Esta expressão é uma das muitas que resultaram de diversas parametrizações do espectro original apresentado pelo grupo JONSWAP. Esta formulação, que contém três parâmetros:  $H_S$ ,  $f_p$  (ou  $T_p$ ) e  $\gamma$ , foi proposta por Goda, 1979, razão pela qual este espectro é muitas vezes designado por JONSWAP-Goda (Carratalá, 1995).

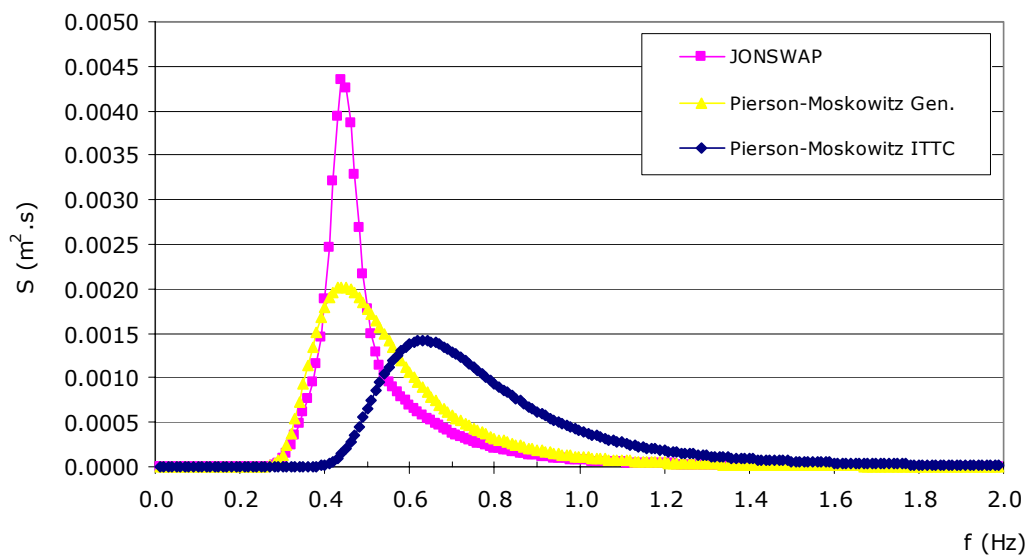
A seguir, nas Figs. A-1 a A-3, apresentam-se três exemplos dos três tipos de espectro referidos nesta secção (espectros P-M Generalizado, P-M ITTC e JONSWAP), considerando, respectivamente, períodos de pico,  $T_p = 8, 10$  e  $12$  s, que, à escala  $1/50$ , de acordo com a Eq. (5-2), têm o valor de, respectivamente,  $1.13$  s,  $1.41$  s e  $1.70$  s. A altura de onda correspondente a estes espectros tem o valor constante de  $5$  m, o que, à escala  $1/50$ , significa  $0.1$  m.



**Fig. A-1** - Espectros de JONSWAP ( $\gamma=3.3$ ) e P-M Gen., com  $H_S = 0.1$  m e  $T_p = 1.13$  s, e espectro P-M ITTC, com  $H_S = 0.1$  m



**Fig. A-2** - Espectros de JONSWAP ( $\gamma=3.3$ ) e P-M Gen., com  $H_S = 0.1$  m e  $T_p = 1.41$  s, e espectro P-M ITTC, com  $H_S = 0.1$  m



**Fig. A-3** - Espectros de JONSWAP ( $\gamma=3.3$ ) e P-M Gen., com  $H_S = 0.1 \text{ m}$  e  $T_p = 1.70 \text{ s}$ , e espectro P-M ITTC, com  $H_S = 0.1 \text{ m}$

## **ANEXO 3 - DEDUÇÕES MATEMÁTICAS**





## DENSIDADE BIVARIADA DE RAYLEIGH

Kimura, 1980, apresenta a seguinte fórmula para a densidade de probabilidade bivariada de Rayleigh:

$$f(x,y) = \frac{4xy}{(1-4\rho^2)h_r^4} \exp\left[-\frac{1}{1-4\rho^2} \frac{(x^2+y^2)}{h_r^2}\right] I_0\left(\frac{4xy\rho}{(1-4\rho^2)h_r^2}\right) \quad (\text{A-23})$$

sendo

$$h_r^2 \quad - \quad \text{o quadrado da altura média quadrática: } h_r^2 = \left(\sqrt{E[H^2]}\right)^2 = 8 m_0;$$

$I_0()$  - a função de Bessel modificada de ordem zero;

$\rho$  - parâmetro de correlação entre alturas de onda.

Vem, portanto,

$$f(x,y) = \frac{4xy}{(1-4\rho^2)64m_0^2} \exp\left[-\frac{1}{1-4\rho^2} \frac{(x^2+y^2)}{8m_0}\right] I_0\left(\frac{4xy\rho}{(1-4\rho^2)8m_0}\right) \quad (\text{A-24})$$

Fazendo agora, como indicam Medina e Hudspeth, 1990,

$$\kappa = 2 \rho \quad (\text{A-25})$$

vem

$$f(x,y) = \frac{4xy}{(1-\kappa^2)64m_0^2} \exp\left[-\frac{1}{1-\kappa^2} \frac{(x^2+y^2)}{8m_0}\right] I_0\left(\frac{2\kappa xy}{(1-\kappa^2)8m_0}\right) \quad (\text{A-26})$$

ou seja

$$f(x,y) = \frac{xy}{16(1-\kappa^2)m_0^2} \exp\left[-\frac{(x^2+y^2)}{8m_0(1-\kappa^2)}\right] I_0\left(\frac{\kappa xy}{4m_0(1-\kappa^2)}\right) \quad (\text{A-27})$$

que é a Eq. (3-24) usada neste trabalho e apresentada por Medina e Hudspeth, 1990.

Por outro lado, Vledder, 1992, escreve a densidade bivariada de Rayleigh da seguinte forma:

$$f(x,y) = \frac{\pi^2}{4} \frac{xy}{H_m^4(1-\kappa^2)} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \frac{(x^2+y^2)}{H_m^2(1-\kappa^2)}\right] I_0\left(\frac{\pi}{2} \frac{\kappa xy}{H_m^2(1-\kappa^2)}\right) \quad (\text{A-28})$$

em que  $H_m$  é a altura média, ou seja,

$$H_m = \sqrt{2\pi m_0} \quad (\text{A-29})$$

Assim, vem

$$f(x, y) = \frac{\pi^2}{4} \frac{xy}{4\pi^2 m_0^2 (1-\kappa^2)} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \frac{(x^2 + y^2)}{2\pi m_0 (1-\kappa^2)}\right] I_0\left(\frac{\pi}{2} \frac{\kappa xy}{2\pi m_0 (1-\kappa^2)}\right) \quad (\text{A-30})$$

ou seja

$$f(x, y) = \frac{xy}{16(1-\kappa^2)m_0^2} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{8m_0(1-\kappa^2)}\right] I_0\left(\frac{\kappa xy}{4m_0(1-\kappa^2)}\right) \quad (\text{A-31})$$

que é novamente a Eq. (3-24) usada neste trabalho.

**Nota:** Sabe-se que a distribuição de Rayleigh é um caso particular da de Weibull. A função de distribuição de Weibull é dada por

$$F_W(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{b}\right)^c\right] \quad (\text{A-32})$$

que tem o valor médio dado por

$$E[W] = b\Gamma\left(\frac{c+1}{c}\right) \quad (\text{A-33})$$

Obtém-se a distribuição de Rayleigh, fazendo  $c = 2$ . Para fazer aparecer o parâmetro  $m_0$ , faz-se ainda

$$b = \sqrt{8m_0}$$

A função de distribuição de Rayleigh é então

$$F_R(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\sqrt{8m_0}}\right)^2\right] = 1 - \exp\left(-\frac{x^2}{8m_0}\right) \quad (\text{A-34})$$

e o seu valor médio é dado por

$$E[H] = \sqrt{8m_0} \Gamma\left(\frac{2+1}{2}\right) = \sqrt{8m_0} \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = \sqrt{8m_0} \frac{1}{2} \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{8m_0} \frac{1}{2} \sqrt{\pi} = \sqrt{2\pi m_0} \quad (\text{A-35})$$

## FÓRMULAS DE LONGUET-HIGGINS

Em Medina e Hudspeth, 1990, é apresentada a fórmula de Longuet-Higgins para o valor médio do número de ondas por grupo de nível  $a$  (fórmula 31 daquele artigo) com o seguinte aspecto:

$$E[J] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sqrt{1+v^2}}{v} \frac{\sqrt{m_0}}{a} \quad (\text{A-36})$$

em que  $\nu$  está relacionado com o parâmetro  $\kappa$  por

$$\nu = \frac{\sqrt{1-\kappa^2}}{2\pi} \quad (\text{A-37})$$

Fazendo esta substituição e pondo  $a = \nu$ , vem

$$E[J] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sqrt{1 + \frac{1-\kappa^2}{4\pi^2}}}{\frac{\sqrt{1-\kappa^2}}{2\pi}} \frac{\sqrt{m_0}}{\nu} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sqrt{\frac{4\pi^2 + 1 - \kappa^2}{4\pi^2}}}{\frac{\sqrt{1-\kappa^2}}{2\pi}} \frac{\sqrt{m_0}}{\nu} = \frac{1}{\nu} \sqrt{\frac{m_0(4\pi^2 + 1 - \kappa^2)}{2\pi(1-\kappa^2)}} \quad (\text{A-38})$$

que é a Eq. (3-33) deste trabalho.

No trabalho citado, aparece igualmente a fórmula de Longuet-Higgins para o valor médio do número de ondas por chorrilho completo de nível  $\nu$ , que, usando a simbologia considerada neste trabalho, fica com o seguinte aspecto:

$$E[G] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sqrt{1+\nu^2}}{\nu} \frac{\sqrt{m_0}}{a} \exp\left(\frac{\nu^2}{2m_0}\right) \quad (\text{A-39})$$

donde se conclui facilmente que

$$E[G] = E[J] \exp\left(\frac{\nu^2}{2m_0}\right) \quad (\text{A-40})$$

que é a Eq. (3-34) do presente texto.

## DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL COM BASE NO PE DE POISSON

Como se disse no texto desta dissertação, Nolte e Hsu, 1972, adoptam para  $D$  a distribuição exponencial, com base na hipótese de que o número de vezes que a envolvente cruza o nível  $\nu$ , para cima ou para baixo,  $N(t)$ , é um processo estocástico PE de Poisson.

Os axiomas do PE de Poisson são:

- 1)  $N(t_2) - N(t_1)$  é independente de  $N(s_2) - N(s_1)$ , se os intervalos  $(t_1, t_2)$  e  $(s_1, s_2)$  são disjuntos (isto é,  $N(t)$  tem incrementos independentes)
- 2)  $N(t)$  tem incrementos estacionários
- 3) É diferente de 0 e 1 a probabilidade de, num certo intervalo, haver cruzamentos de certo nível por parte da envolvente
- 4) É nula a probabilidade de dois cruzamentos simultâneos

Se forem válidos estes axiomas,  $D$  tem a distribuição exponencial. Com efeito, designando  $p_0(D_c) = P[\text{Num intervalo de tamanho } D_c \text{ não há cruzamentos}] = P[N(t+D_c) - N(t) = 0]$ , (independentemente de  $t$ , pelo axioma 2), tem-se,

$$\begin{aligned} p_0(D_c+k) &= P[N(t+D_c+k) - N(t) = 0] = P[N(t+D_c+k) - N(t+k) + N(t+k) - N(t) = 0] = \\ &= P[N(t+D_c+k) - N(t+k) = 0 ; N(t+k) - N(t) = 0] \end{aligned}$$

Aplicando agora o axioma 1, vem

$$\begin{aligned} &= P[N(t+D_c+k) - N(t+k) = 0] \cdot P[N(t+k) - N(t) = 0] = \\ &= p_0(D_c) \cdot p_0(k) \end{aligned}$$

ou seja, tem-se

$$p_0(D_c+k) = p_0(D_c) \cdot p_0(k)$$

conhecida equação funcional, cuja solução é, como se sabe (teorema 1B de Parzen, 1964),

$$p_0(D_c) = \exp(-c D_c)$$

em que  $c$  é uma constante. Tem-se, em seguida,

$$\begin{aligned} p_0(D_c) &= P[\text{num intervalo de tamanho } D_c \text{ não há cruzamentos}] = \\ &= P[\text{o intervalo de tempo } D \text{ entre cruzamentos} > D_c] = P[D > D_c] = \\ &= 1 - P[D \leq D_c] = 1 - F_D(D_c) \end{aligned}$$

donde sai

$$F_D(D_c) = 1 - p_0(D_c) = 1 - \exp(-c D_c) \tag{A-41}$$

que é a função de distribuição exponencial.

## OBTENÇÃO DA FASE DA ONDA REFLECTIDA

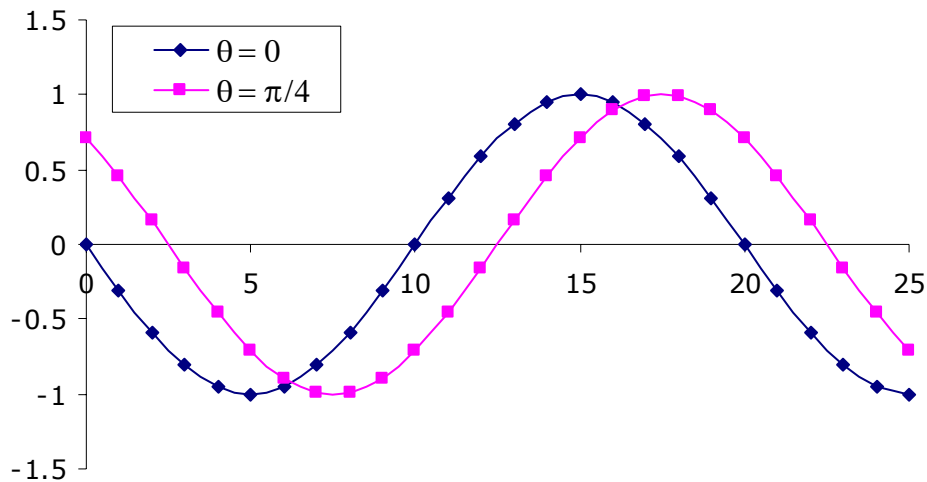
Considere-se a onda progressiva incidente já considerada antes, Eq. (5-22),

$$z_+(t, x) = a \sin(2\pi t/T - 2\pi x/L + e)$$

no instante  $t = 0$ :

$$z_+(0, x) = a \sin(-2\pi x/L + e)$$

Examine-se agora, mediante o gráfico da Fig. A-4, a posição da onda conforme os diferentes valores da fase  $e$ , fazendo, por exemplo,  $a = 1$  e  $L = 20$ . Verifica-se que passar  $e = 0$  para  $e = d/4$  corresponde a um deslocamento para a direita de  $\delta = L/8$ .



**Fig. A-4 - Fase,  $\theta$ , e deslocamento,  $\delta$ , da onda incidente para  $a = 1$  e  $L = 20$**

O Quadro A-1 seguinte dá os deslocamentos,  $\delta$ , para a direita correspondentes a diversos valores da fase  $e$ . Notar que  $\sin e$  dá o valor da ordenada na origem ( $x = 0$ ).

**Quadro A-1 - Deslocamentos para diferentes fases da onda incidente**

|          |   |         |         |         |       |       |      |       |
|----------|---|---------|---------|---------|-------|-------|------|-------|
| $e$      | 0 | $d/16$  | $d/8$   | $d/4$   | $d/2$ | $d$   | $2d$ | $2ds$ |
| $\sin e$ | 0 | 0.19509 | 0.38268 | 0.70711 | 1     | 0     | 0    | 0     |
| $\delta$ | 0 | $L/32$  | $L/16$  | $L/8$   | $L/4$ | $L/2$ | $L$  | $sL$  |

Conclui-se, pois, que, fixado um dado instante, o valor da fase expresso em  $2ds$  (sendo  $s = 1, 2, \dots$ ) é equivalente a um deslocamento da onda, relativamente à posição de fase nula, dado por  $sL$ , ou seja,

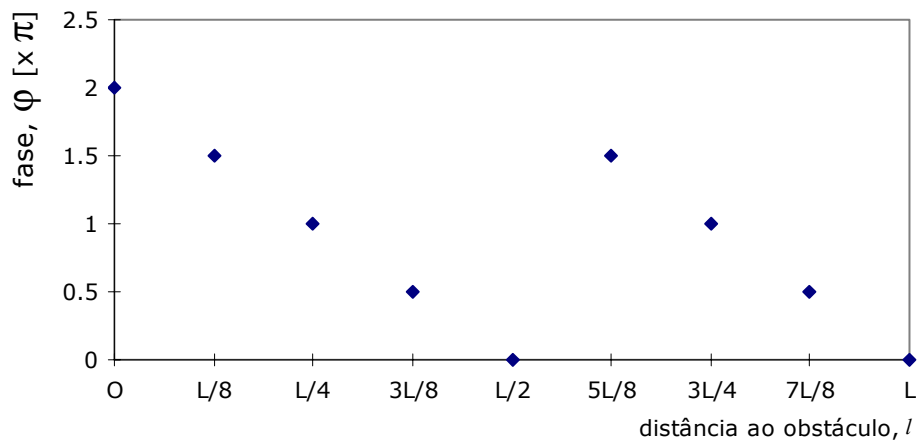
$$\delta(2ds) = sL$$

Pode, assim, dizer-se, que a fase  $e$  correspondente a um deslocamento  $sL$  é  $2ds$  :

$$e(sL) = 2ds$$

Considerar-se-á agora a reflexão. Tenha-se em atenção que a onda reflectida se desloca no sentido negativo e, por isso, é da forma da Eq. (5-23).

Dado um obstáculo vertical, totalmente reflector, a onda reflectida constrói-se como prolongamento da "onda imagem", obtida como se o obstáculo fosse um espelho. A Fig. A-5 mostra as fases das ondas reflectidas da onda inicial, no instante zero e considerada a fase nula, para obstáculos colocados às distâncias  $l = L/8, L/4, 3L/8, L/2, 5L/8, 3L/4, 7L/8$  e  $L$  do ponto considerado (abscissa 0).



**Fig. A-5 - Reflexão de onda em função da distância,  $l$ , do ponto considerado (abscissa 0) ao obstáculo**

Para obter as equações das rectas que unem os pontos do gráfico da Fig. A-5, parte-se da fórmula geral da equação da recta que passa pelos pontos  $(x_1, y_1)$  e  $(x_2, y_2)$ :

$$\frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{x-x_1}{x_2-x_1}$$

Para

$$0 < x < \frac{L}{2}$$

$$x_1 = 0 \quad x_2 = \frac{L}{2}$$

$$y_1 = 2\pi \quad y_2 = 0$$

$$\frac{y-2\pi}{0-2\pi} = \frac{l-0}{\frac{L}{2}-0}$$

$$y-2\pi = -2\pi l \frac{2}{L}$$

$$y = 2\pi - 4\pi \frac{l}{L}$$

ou seja, finalmente,

$$y = -4\pi \frac{l}{L} + 2\pi$$

$$\frac{L}{2} < x < L$$

$$x_1 = \frac{L}{2} \quad x_2 = L$$

$$y_1 = 2\pi \quad y_2 = 0$$

$$\frac{y-2\pi}{0-2\pi} = \frac{l-\frac{L}{2}}{L-\frac{L}{2}}$$

$$y-2\pi = -2\pi \left( l - \frac{L}{2} \right) \frac{2}{L}$$

$$y = 2\pi - 4\pi \frac{l}{L} + 2\pi$$

$$y = -4\pi \frac{l}{L} + 4\pi$$

Verifica-se facilmente que, em dado ponto, a fase da onda reflectida,  $\hat{\varphi}$ , tem uma relação com a distância,  $l$ , desse ponto ao obstáculo do tipo

$$\hat{\Lambda}(l) = -4 d \frac{l}{L} + 2d \quad \text{para} \quad 0 < l \leq \frac{L}{2}$$

$$\hat{\Lambda}(l) = -4 d \frac{l}{L} + 4d \quad \text{para} \quad \frac{L}{2} < l \leq L$$

etc.,

ou seja,

$$\hat{\Lambda}(l) = -4 d \frac{l}{L} + 2 i d \quad \text{para} \quad (i-1) \frac{L}{2} < l \leq i \frac{L}{2}$$

A cada distância  $l$  corresponde, portanto, um inteiro  $i$  tal que

$$i \notin \frac{2l}{L} \quad \text{e} \quad i < \frac{2l}{L} + 1$$

ou seja,

$$\frac{2l}{L} < i < \frac{2l}{L} + 1$$

o que permite calcular  $i$  em função de  $l$  pela fórmula

$$i = \text{int} \left( \frac{2l}{L} \right) + 1$$

e obter a correspondente fase da onda reflectida

$$\hat{\Lambda}(l) = -4 d \frac{l}{L} + 2 i d$$

Por este processo, é possível calcular as fases  $\hat{\Lambda}_{nk}$ , das Eqs. (5-25) e (5-27), em função das distâncias,  $l$ , da sonda  $n$  ao obstáculo.





## **ANEXO 4 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA**



EXTRACTO DOS RESULTADOS DOS EXEMPLOS NUMÉRICOS - SIMCOND

Quadro A-2 - Extracto dos resultados SIMCOND – Simulação Condicionada

| t (s) | $\eta_u$ (m) | $\eta_o$ (m) | $\eta_c$ (m) |
|-------|--------------|--------------|--------------|
| 0     | -0.30        |              | -0.30        |
| 1     | -1.77        |              | -1.77        |
| 2     | -1.44        |              | -1.44        |
| 3     | -0.12        |              | -0.12        |
| 4     | 1.34         |              | 1.35         |
| 5     | 1.81         |              | 1.81         |
| 6     | 0.68         |              | 0.68         |
| 7     | -0.27        |              | -0.27        |
| 8     | -0.65        |              | -0.65        |
| 9     | -0.41        |              | -0.41        |
| 10    | -0.84        |              | -0.84        |
| 11    | -0.45        |              | -0.44        |
| 12    | 0.25         |              | 0.26         |
| 13    | 0.72         |              | 0.72         |
| 14    | 0.98         |              | 0.98         |
| 15    | 0.19         |              | 0.18         |
| 16    | -1.18        |              | -1.18        |
| 17    | -0.82        |              | -0.82        |
| 18    | 0.02         |              | 0.03         |
| 19    | 0.59         |              | 0.60         |
| 20    | 0.45         |              | 0.46         |
| 21    | -0.03        |              | -0.03        |
| 22    | 0.29         |              | 0.29         |
| 23    | -0.23        |              | -0.24        |
| 24    | -0.02        |              | -0.03        |
| 25    | -0.90        |              | -0.91        |
| 26    | -0.39        |              | -0.38        |
| 27    | 0.68         |              | 0.69         |
| 28    | 0.20         |              | 0.22         |
| 29    | -0.39        |              | -0.38        |
| 30    | 0.07         |              | 0.07         |
| 31    | 0.61         |              | 0.60         |
| 32    | 0.28         |              | 0.27         |
| 33    | 0.38         |              | 0.37         |
| 34    | 0.15         |              | 0.15         |
| 35    | -1.03        |              | -1.01        |
| 36    | -1.39        |              | -1.36        |
| 37    | -0.38        |              | -0.36        |
| 38    | 0.89         |              | 0.89         |
| 39    | 1.30         |              | 1.28         |
| 40    | 0.99         |              | 0.95         |
| 41    | -0.57        |              | -0.60        |
| 42    | -1.28        |              | -1.29        |
| 43    | 0.06         |              | 0.09         |
| 44    | 0.55         |              | 0.60         |
| 45    | -0.06        |              | -0.01        |
| 46    | -0.41        |              | -0.40        |
| 47    | 0.15         |              | 0.12         |
| 48    | 0.38         |              | 0.32         |
| 49    | -0.11        |              | -0.18        |
| 50    | -0.80        |              | -0.82        |
| 51    | 0.25         |              | 0.28         |
| 52    | 1.08         |              | 1.16         |
| 53    | 0.51         |              | 0.60         |
| 54    | -0.82        |              | -0.78        |
| 55    | -0.81        |              | -0.85        |
| 56    | -0.03        |              | -0.14        |
| 57    | 0.44         |              | 0.32         |
| 58    | 1.11         |              | 1.06         |
| 59    | 0.77         |              | 0.83         |
| 60    | -0.85        |              | -0.70        |
| 61    | -1.03        |              | -0.85        |
| 62    | -0.68        |              | -0.58        |
| 63    | 0.04         |              | -0.02        |
| 64    | 0.90         |              | 0.69         |
| 65    | 0.62         |              | 0.37         |
| 66    | 0.22         |              | 0.06         |
| 67    | 0.26         |              | 0.30         |
| 68    | 0.75         |              | 1.00         |
| 69    | -0.29        |              | 0.05         |
| 70    | -1.27        |              | -1.03        |
| 71    | -1.25        |              | -1.26        |
| 72    | -0.19        |              | -0.46        |

| t (s) | $\eta_u$ (m) | $\eta_o$ (m) | $\eta_c$ (m) |
|-------|--------------|--------------|--------------|
| 86    | -0.36        |              | -0.04        |
| 87    | -0.27        |              | -0.70        |
| 88    | -0.07        |              | -1.12        |
| 89    | 0.90         |              | -0.27        |
| 90    | 0.96         |              | 0.37         |
| 91    | -0.04        |              | 0.44         |
| 92    | -1.35        |              | 0.14         |
| 93    | -1.31        |              | 0.52         |
| 94    | -0.96        |              | 0.22         |
| 95    | 0.66         |              | 0.43         |
| 96    | 1.05         |              | -0.70        |
| 97    | 1.69         |              | -0.88        |
| 98    | 1.44         |              | -0.68        |
| 99    | 0.02         | <b>-0.45</b> | <b>-0.45</b> |
| 100   | -2.04        | <b>0.23</b>  | <b>0.23</b>  |
| 101   | -3.00        | <b>1.29</b>  | <b>1.29</b>  |
| 102   | -0.89        | <b>0.59</b>  | <b>0.59</b>  |
| 103   | 1.21         | <b>0.37</b>  | <b>0.37</b>  |
| 104   | 0.97         | <b>-0.48</b> | <b>-0.48</b> |
| 105   | 1.22         | <b>-1.29</b> | <b>-1.29</b> |
| 106   | 1.34         | <b>-0.41</b> | <b>-0.41</b> |
| 107   | 1.01         | <b>1.25</b>  | <b>1.25</b>  |
| 108   | -0.30        | <b>0.03</b>  | <b>0.03</b>  |
| 109   | -0.98        | <b>-0.98</b> | <b>-0.98</b> |
| 110   | -1.70        | <b>-0.80</b> | <b>-0.80</b> |
| 111   | -1.58        | <b>0.64</b>  | <b>0.64</b>  |
| 112   | -0.11        | <b>2.00</b>  | <b>2.00</b>  |
| 113   | 1.25         | <b>-0.16</b> | <b>-0.16</b> |
| 114   | 1.71         | <b>-0.42</b> | <b>-0.42</b> |
| 115   | 1.21         | <b>-0.53</b> | <b>-0.53</b> |
| 116   | 0.28         | <b>-0.90</b> | <b>-0.90</b> |
| 117   | -1.46        | <b>-0.35</b> | <b>-0.35</b> |
| 118   | -1.42        | <b>0.61</b>  | <b>0.61</b>  |
| 119   | -0.73        | <b>0.72</b>  | <b>0.72</b>  |
| 120   | -0.06        | <b>-0.45</b> | <b>-0.45</b> |
| 121   | 1.31         | <b>-0.25</b> | <b>-0.25</b> |
| 122   | 1.45         | <b>1.22</b>  | <b>1.22</b>  |
| 123   | 0.50         | <b>0.64</b>  | <b>0.64</b>  |
| 124   | -1.10        | <b>-1.21</b> | <b>-1.21</b> |
| 125   | -1.50        | <b>-1.02</b> | <b>-1.02</b> |
| 126   | -0.90        | <b>-0.74</b> | <b>-0.74</b> |
| 127   | -0.29        | <b>0.19</b>  | <b>0.19</b>  |
| 128   | 1.42         | <b>0.67</b>  | <b>0.67</b>  |
| 129   | 2.43         |              | 1.48         |
| 130   | 1.52         |              | 1.46         |
| 131   | -1.07        |              | -0.51        |
| 132   | -2.20        |              | -1.53        |
| 133   | -1.73        |              | -1.37        |
| 134   | 0.35         |              | 0.31         |
| 135   | 1.51         |              | 1.17         |
| 136   | 0.82         |              | 0.39         |
| 137   | -0.02        |              | -0.34        |
| 138   | 0.38         |              | 0.32         |
| 139   | 0.48         |              | 0.67         |
| 140   | -0.54        |              | -0.22        |
| 141   | -1.16        |              | -0.88        |
| 142   | -1.00        |              | -0.89        |
| 143   | -0.41        |              | -0.53        |
| 144   | 0.46         |              | 0.23         |
| 145   | 1.11         |              | 0.89         |
| 146   | 0.75         |              | 0.67         |
| 147   | 0.59         |              | 0.67         |
| 148   | -0.01        |              | 0.16         |
| 149   | -1.27        |              | -1.12        |
| 150   | -0.82        |              | -0.76        |
| 151   | -0.46        |              | -0.51        |
| 152   | -0.34        |              | -0.45        |
| 153   | 0.49         |              | 0.39         |
| 154   | 1.10         |              | 1.07         |
| 155   | 0.21         |              | 0.25         |
| 156   | -0.42        |              | -0.34        |
| 157   | 0.00         |              | 0.06         |
| 158   | 0.56         |              | 0.58         |

| t (s) | $\eta_u$ (m) | $\eta_o$ (m) | $\eta_c$ (m) |
|-------|--------------|--------------|--------------|
| 172   | 1.70         |              | 1.73         |
| 173   | 0.80         |              | 0.82         |
| 174   | -0.46        |              | -0.46        |
| 175   | -2.01        |              | -2.02        |
| 176   | -2.62        |              | -2.64        |
| 177   | -1.28        |              | -1.29        |
| 178   | 1.74         |              | 1.74         |
| 179   | 2.62         |              | 2.62         |
| 180   | 2.39         |              | 2.40         |
| 181   | 0.02         |              | 0.03         |
| 182   | -2.09        |              | -2.08        |
| 183   | -2.03        |              | -2.03        |
| 184   | -1.65        |              | -1.65        |
| 185   | -0.21        |              | -0.22        |
| 186   | 1.74         |              | 1.74         |
| 187   | 2.31         |              | 2.32         |
| 188   | 1.38         |              | 1.39         |
| 189   | -0.48        |              | -0.48        |
| 190   | -1.70        |              | -1.69        |
| 191   | -1.58        |              | -1.58        |
| 192   | -0.56        |              | -0.56        |
| 193   | -0.16        |              | -0.16        |
| 194   | 0.11         |              | 0.11         |
| 195   | 1.60         |              | 1.60         |
| 196   | 2.34         |              | 2.35         |
| 197   | 0.65         |              | 0.65         |
| 198   | -1.95        |              | -1.94        |
| 199   | -2.67        |              | -2.67        |
| 200   | -1.45        |              | -1.45        |
| 201   | 0.32         |              | 0.32         |
| 202   | 1.65         |              | 1.65         |
| 203   | 1.53         |              | 1.53         |
| 204   | 0.83         |              | 0.84         |
| 205   | 0.06         |              | 0.07         |
| 206   | -0.88        |              | -0.88        |
| 207   | -1.64        |              | -1.63        |
| 208   | -0.86        |              | -0.86        |
| 209   | 0.23         |              | 0.23         |
| 210   | -0.11        |              | -0.11        |
| 211   | 0.92         |              | 0.92         |
| 212   | 1.23         |              | 1.24         |
| 213   | 0.33         |              | 0.33         |
| 214   | -0.01        |              | 0.00         |
| 215   | 0.23         |              | 0.23         |
| 216   | -1.18        |              | -1.18        |
| 217   | -1.52        |              | -1.52        |
| 218   | -0.30        |              | -0.30        |
| 219   | 1.35         |              | 1.35         |
| 220   | 1.13         |              | 1.13         |
| 221   | -0.23        |              | -0.23        |
| 222   | -0.38        |              | -0.38        |
| 223   | 0.00         |              | 0.00         |
| 224   | -0.25        |              | -0.25        |
| 225   | -0.21        |              | -0.21        |
| 226   | 0.77         |              | 0.77         |
| 227   | 0.06         |              | 0.06         |
| 228   | -1.24        |              | -1.24        |
| 229   | -0.71        |              | -0.71        |
| 230   | -0.40        |              | -0.40        |
| 231   | 1.08         |              | 1.09         |
| 232   | 1.38         |              | 1.39         |
| 233   | 0.93         |              | 0.93         |
| 234   | -0.11        |              | -0.11        |
| 235   | -0.84        |              | -0.84        |
| 236   | -1.30        |              | -1.30        |
| 237   | -1.69        |              | -1.69        |
| 238   | -0.14        |              | -0.14        |
| 239   | 1.43         |              | 1.44         |
| 240   | 0.96         |              | 0.97         |
| 241   | 0.39         |              | 0.39         |
| 242   | -0.12        |              | -0.12        |
| 243   | -0.35        |              | -0.35        |
| 244   | -0.65        |              | -0.65        |

| t (s) | $\eta_u$ (m) | $\eta_o$ (m) | $\eta_c$ (m) |
|-------|--------------|--------------|--------------|
| 258   | 1.37         |              | 1.38         |
| 259   | 0.25         |              | 0.25         |
| 260   | -0.18        |              | -0.18        |
| 261   | -0.83        |              | -0.83        |
| 262   | -0.94        |              | -0.93        |
| 263   | -0.17        |              | -0.17        |
| 264   | 0.94         |              | 0.94         |
| 265   | 0.84         |              | 0.84         |
| 266   | 0.44         |              | 0.44         |
| 267   | -0.21        |              | -0.21        |
| 268   | -0.85        |              | -0.85        |
| 269   | 0.14         |              | 0.14         |
| 270   | 0.20         |              | 0.21         |
| 271   | -0.38        |              | -0.38        |
| 272   | -0.60        |              | -0.59        |
| 273   | 0.05         |              | 0.05         |
| 274   | 0.92         |              | 0.92         |
| 275   | 1.32         |              | 1.32         |
| 276   | 0.80         |              | 0.80         |
| 277   | -0.95        |              | -0.95        |
| 278   | -1.47        |              | -1.47        |
| 279   | -1.18        |              | -1.18        |
| 280   | 0.20         |              | 0.20         |
| 281   | 1.23         |              | 1.23         |
| 282   | 1.36         |              | 1.36         |
| 283   | 0.47         |              | 0.47         |
| 284   | -0.64        |              | -0.64        |
| 285   | -1.23        |              | -1.23        |
| 286   | -0.99        |              | -0.98        |
| 287   | -0.46        |              | -0.46        |
| 288   | 0.80         |              | 0.81         |
| 289   | 1.12         |              | 1.12         |
| 290   | 0.19         |              | 0.19         |
| 291   | 0.26         |              | 0.26         |
| 292   | 0.73         |              | 0.74         |
| 293   | -0.32        |              | -0.32        |
| 294   | -1.90        |              | -1.90        |
| 295   | -0.95        |              | -0.95        |
| 296   | 0.73         |              | 0.73         |
| 297   | 1.57         |              | 1.57         |
| 298   | 0.68         |              | 0.68         |
| 299   | 0.66         |              | 0.66         |
| 300   | -0.16        |              | -0.15        |
| 301   | -1.30        |              | -1.30        |
| 302   | -1.19        |              | -1.19        |
| 303   | -0.72        |              | -0.72        |
| 304   | 0.76         |              | 0.76         |
| 305   | 1.59         |              | 1.59         |
| 306   | 1.43         |              | 1.43         |
| 307   | 0.18         |              | 0.18         |
| 308   | -1.13        |              | -1.13        |
| 309   | -1.32        |              | -1.32        |
| 310   | -1.40        |              | -1.39        |
| 311   | -0.06        |              | -0.06        |
| 312   | 1.14         |              | 1.14         |
| 313   | 1.59         |              | 1.59         |
| 314   | 0.71         |              | 0.71         |
| 315   | -1.18        |              | -1.18        |
| 316   | -0.79        |              | -0.79        |
| 317   | -0.55        |              | -0.55        |
| 318   | -0.52        |              | -0.51        |
| 319   | -0.05        |              | -0.05        |
| 320   | 0.89         |              | 0.89         |
| 321   | 0.63         |              | 0.63         |
| 322   | 0.23         |              | 0.23         |
| 323   | 0.13         |              | 0.13         |
| 324   | -0.23        |              | -0.22        |
| 325   | -0.58        |              | -0.58        |
| 326   | -0.91        |              | -0.91        |
| 327   | 0.27         |              | 0.27         |
| 328   | 1.06         |              | 1.07         |
| 329   | 0.73         |              | 0.73         |
| 330   | -0.78        |              | -0.78        |

## CÁLCULOS DE REFLEXÃO – SIMULAÇÃO NUMÉRICA - MÉTODO DAS 2 SONDAS

**Quadro A-3 - Extracto dos valores do espectro incidente inicial ( $S$ ), do espectro incidente reconstituído alisado ( $S_i$ ), do espectro reflectido reconstituído alisado ( $S_r$ ) e do coeficiente de reflexão ( $r_k$ ) para a simulação do Caso N1-S2 ( $k = 51$  a  $150$ )**

| $k$                       | $f$<br>(Hz) | $S$<br>(*10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> .s) | $S_i$<br>(*10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> .s) | $S_r$<br>(*10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> .s) | $r_k$       |
|---------------------------|-------------|--|--|--|-------------|
| 51                        | 0.425       | 0.72   | 0.72   | 0.12   | 0.40        |
| 52                        | 0.433       | 0.92   | 0.92   | 0.15   | 0.40        |
| 53                        | 0.442       | 1.14   | 1.14   | 0.18   | 0.40        |
| 54                        | 0.450       | 1.38   | 1.38   | 0.22   | 0.40        |
| 55                        | 0.458       | 1.64   | 1.64   | 0.26   | 0.40        |
| 56                        | 0.467       | 1.91   | 1.91   | 0.31   | 0.40        |
| 57                        | 0.475       | 2.20   | 2.20   | 0.35   | 0.40        |
| 58                        | 0.483       | 2.50   | 2.50   | 0.40   | 0.40        |
| 59                        | 0.492       | 2.84   | 2.84   | 0.45   | 0.40        |
| 60                        | 0.500       | 3.22   | 3.22   | 0.52   | 0.40        |
| 61                        | 0.508       | 3.68   | 3.68   | 0.59   | 0.40        |
| 62                        | 0.517       | 4.24   | 4.24   | 0.68   | 0.40        |
| 63                        | 0.525       | 4.94   | 4.94   | 0.79   | 0.40        |
| 64                        | 0.533       | 5.83   | 5.83   | 0.93   | 0.40        |
| 65                        | 0.542       | 6.92   | 6.92   | 1.11   | 0.40        |
| 66                        | 0.550       | 8.23   | 8.23   | 1.32   | 0.40        |
| 67                        | 0.558       | 9.67   | 9.67   | 1.55   | 0.40        |
| 68                        | 0.567       | 11.11  | 11.11  | 1.78   | 0.40        |
| 69                        | 0.575       | 12.30  | 12.30  | 1.97   | 0.40        |
| 70                        | 0.583       | 13.02  | 13.02  | 2.08   | 0.40        |
| 71                        | 0.592       | 13.10  | 13.10  | 2.10   | 0.40        |
| 72                        | 0.600       | 12.71  | 12.71  | 2.03   | 0.40        |
| 73                        | 0.608       | 11.96  | 11.96  | 1.91   | 0.40        |
| 74                        | 0.617       | 10.96  | 10.96  | 1.75   | 0.40        |
| 75                        | 0.625       | 9.83   | 9.83   | 1.57   | 0.40        |
| 76                        | 0.633       | 8.69   | 8.69   | 1.39   | 0.40        |
| 77                        | 0.642       | 7.62   | 7.62   | 1.22   | 0.40        |
| 78                        | 0.650       | 6.67   | 6.67   | 1.07   | 0.40        |
| 79                        | 0.658       | 5.86   | 5.86   | 0.94   | 0.40        |
| 80                        | 0.667       | 5.19   | 5.19   | 0.83   | 0.40        |
| 81                        | 0.675       | 4.64   | 4.64   | 0.74   | 0.40        |
| 82                        | 0.683       | 4.19   | 4.19   | 0.67   | 0.40        |
| 83                        | 0.692       | 3.84   | 3.84   | 0.61   | 0.40        |
| 84                        | 0.700       | 3.55   | 3.55   | 0.57   | 0.40        |
| 85                        | 0.708       | 3.32   | 3.32   | 0.53   | 0.40        |
| 86                        | 0.717       | 3.13   | 3.13   | 0.50   | 0.40        |
| 87                        | 0.725       | 2.97   | 2.97   | 0.47   | 0.40        |
| 88                        | 0.733       | 2.83   | 2.83   | 0.45   | 0.40        |
| 89                        | 0.742       | 2.71   | 2.71   | 0.43   | 0.40        |
| 90                        | 0.750       | 2.60   | 2.60   | 0.42   | 0.40        |
| 91                        | 0.758       | 2.50   | 2.50   | 0.40   | 0.40        |
| 92                        | 0.767       | 2.41   | 2.41   | 0.38   | 0.40        |
| 93                        | 0.775       | 2.32   | 2.32   | 0.37   | 0.40        |
| 94                        | 0.783       | 2.23   | 2.23   | 0.36   | 0.40        |
| 95                        | 0.792       | 2.15   | 2.15   | 0.34   | 0.40        |
| 96                        | 0.800       | 2.07   | 2.07   | 0.33   | 0.40        |
| 97                        | 0.808       | 2.00   | 2.00   | 0.32   | 0.40        |
| 98                        | 0.817       | 1.92   | 1.92   | 0.31   | 0.40        |
| 99                        | 0.825       | 1.85   | 1.85   | 0.30   | 0.40        |
| 100                       | 0.833       | 1.79   | 1.79   | 0.29   | 0.40        |
| 101                       | 0.842       | 1.72   | 1.72   | 0.28   | 0.40        |
| 102                       | 0.850       | 1.66   | 1.66   | 0.26   | 0.40        |
| 103                       | 0.858       | 1.59   | 1.59   | 0.26   | 0.40        |
| 104                       | 0.867       | 1.54   | 1.54   | 0.25   | 0.40        |
| 105                       | 0.875       | 1.48   | 1.48   | 0.24   | 0.40        |
| 106                       | 0.883       | 1.42   | 1.42   | 0.23   | 0.40        |
| 107                       | 0.892       | 1.37   | 1.37   | 0.22   | 0.40        |
| 108                       | 0.900       | 1.32   | 1.32   | 0.21   | 0.40        |
| 109                       | 0.908       | 1.27   | 1.27   | 0.20   | 0.40        |
| 110                       | 0.917       | 1.22   | 1.22   | 0.20   | 0.40        |
| 111                       | 0.925       | 1.18   | 1.18   | 0.19   | 0.40        |
| 112                       | 0.933       | 1.13   | 1.13   | 0.18   | 0.40        |
| 113                       | 0.942       | 1.09   | 1.09   | 0.17   | 0.40        |
| 114                       | 0.950       | 1.05   | 1.05   | 0.17   | 0.40        |
| 115                       | 0.958       | 1.01   | 1.01   | 0.16   | 0.40        |
| 116                       | 0.967       | 0.98   | 0.98   | 0.16   | 0.40        |
| 117                       | 0.975       | 0.94   | 0.94   | 0.15   | 0.40        |
| 118                       | 0.983       | 0.91   | 0.91   | 0.15   | 0.40        |
| 119                       | 0.992       | 0.87   | 0.87   | 0.14   | 0.40        |
| 120                       | 1.000       | 0.84   | 0.84   | 0.13   | 0.40        |
| 121                       | 1.008       | 0.81   | 0.81   | 0.13   | 0.40        |
| 122                       | 1.017       | 0.78   | 0.78   | 0.13   | 0.40        |
| 123                       | 1.025       | 0.76   | 0.76   | 0.12   | 0.40        |
| 124                       | 1.033       | 0.73   | 0.73   | 0.12   | 0.40        |
| 125                       | 1.042       | 0.70   | 0.70   | 0.11   | 0.40        |
| 126                       | 1.050       | 0.68   | 0.68   | 0.11   | 0.40        |
| 127                       | 1.058       | 0.65   | 0.65   | 0.10   | 0.40        |
| 128                       | 1.067       | 0.63   | 0.63   | 0.10   | 0.40        |
| 129                       | 1.075       | 0.61   | 0.61   | 0.10   | 0.40        |
| 130                       | 1.083       | 0.59   | 0.59   | 0.09   | 0.40        |
| 131                       | 1.092       | 0.57   | 0.57   | 0.09   | 0.40        |
| 132                       | 1.100       | 0.55   | 0.55   | 0.09   | 0.40        |
| 133                       | 1.108       | 0.53   | 0.53   | 0.08   | 0.40        |
| 134                       | 1.117       | 0.51   | 0.51   | 0.08   | 0.40        |
| 135                       | 1.125       | 0.49   | 0.49   | 0.08   | 0.40        |
| 136                       | 1.133       | 0.48   | 0.48   | 0.08   | 0.40        |
| 137                       | 1.142       | 0.46   | 0.46   | 0.07   | 0.40        |
| 138                       | 1.150       | 0.45   | 0.45   | 0.07   | 0.40        |
| 139                       | 1.158       | 0.43   | 0.43   | 0.07   | 0.40        |
| 140                       | 1.167       | 0.42   | 0.42   | 0.07   | 0.40        |
| 141                       | 1.175       | 0.40   | 0.40   | 0.06   | 0.40        |
| 142                       | 1.183       | 0.39   | 0.39   | 0.06   | 0.40        |
| 143                       | 1.192       | 0.38   | 0.38   | 0.06   | 0.40        |
| 144                       | 1.200       | 0.37   | 0.37   | 0.06   | 0.40        |
| 145                       | 1.208       | 0.35   | 0.35   | 0.06   | 0.40        |
| 146                       | 1.217       | 0.34   | 0.34   | 0.05   | 0.40        |
| 147                       | 1.225       | 0.33   | 0.33   | 0.05   | 0.40        |
| 148                       | 1.233       | 0.32   | 0.32   | 0.05   | 0.40        |
| 149                       | 1.242       | 0.31   | 0.31   | 0.05   | 0.40        |
| 150                       | 1.250       | 0.30   | 0.30   | 0.05   | 0.40        |
| <b><math>r_0 =</math></b> |             |  |  |  | <b>0.40</b> |

## CÁLCULOS DE REFLEXÃO – SIMULAÇÃO NUMÉRICA - MÉTODO DAS *M* SONDAS

**Quadro A-4 - Extracto dos valores do espectro incidente inicial (*S*), do espectro incidente reconstituído alisado (*Si*), do espectro reflectido reconstituído alisado (*Sr*) e do coeficiente de reflexão (*r<sub>k</sub>*) para a simulação do Caso N1-S3 (*k* = 51 a 150)**

| <i>k</i>              | <i>f</i><br>(Hz) | <i>S</i><br>(*10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> .s) | <i>Si</i><br>(*10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> .s) | <i>Sr</i><br>(*10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> .s) | <i>r<sub>k</sub></i> |
|-----------------------|------------------|---|--|--|----------------------|
| 51                    | 0.283            | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.40                 |
| 52                    | 0.289            | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.40                 |
| 53                    | 0.294            | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.40                 |
| 54                    | 0.300            | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.40                 |
| 55                    | 0.306            | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.40                 |
| 56                    | 0.311            | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.40                 |
| 57                    | 0.317            | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.40                 |
| 58                    | 0.322            | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.40                 |
| 59                    | 0.328            | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.40                 |
| 60                    | 0.333            | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.40                 |
| 61                    | 0.339            | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.40                 |
| 62                    | 0.344            | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.40                 |
| 63                    | 0.350            | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.40                 |
| 64                    | 0.356            | 0.01  | 0.01   | 0.00   | 0.40                 |
| 65                    | 0.361            | 0.01  | 0.01   | 0.00   | 0.40                 |
| 66                    | 0.367            | 0.02  | 0.02   | 0.00   | 0.40                 |
| 67                    | 0.372            | 0.03  | 0.03   | 0.01   | 0.40                 |
| 68                    | 0.378            | 0.05  | 0.05   | 0.01   | 0.40                 |
| 69                    | 0.383            | 0.06  | 0.06   | 0.01   | 0.40                 |
| 70                    | 0.389            | 0.09  | 0.09   | 0.01   | 0.40                 |
| 71                    | 0.394            | 0.12  | 0.12   | 0.02   | 0.40                 |
| 72                    | 0.400            | 0.16  | 0.16   | 0.02   | 0.40                 |
| 73                    | 0.406            | 0.20  | 0.20   | 0.03   | 0.40                 |
| 74                    | 0.411            | 0.25  | 0.25   | 0.04   | 0.40                 |
| 75                    | 0.417            | 0.31  | 0.31   | 0.05   | 0.40                 |
| 76                    | 0.422            | 0.37  | 0.37   | 0.06   | 0.40                 |
| 77                    | 0.428            | 0.44  | 0.44   | 0.07   | 0.40                 |
| 78                    | 0.433            | 0.52  | 0.52   | 0.08   | 0.40                 |
| 79                    | 0.439            | 0.60  | 0.60   | 0.10   | 0.40                 |
| 80                    | 0.444            | 0.69  | 0.69   | 0.11   | 0.40                 |
| 81                    | 0.450            | 0.78  | 0.78   | 0.12   | 0.40                 |
| 82                    | 0.456            | 0.87  | 0.87   | 0.14   | 0.40                 |
| 83                    | 0.461            | 0.97  | 0.97   | 0.16   | 0.40                 |
| 84                    | 0.467            | 1.08  | 1.08   | 0.17   | 0.40                 |
| 85                    | 0.472            | 1.18  | 1.18   | 0.19   | 0.40                 |
| 86                    | 0.478            | 1.29  | 1.29   | 0.21   | 0.40                 |
| 87                    | 0.483            | 1.41  | 1.41   | 0.23   | 0.40                 |
| 88                    | 0.489            | 1.53  | 1.53   | 0.25   | 0.40                 |
| 89                    | 0.494            | 1.66  | 1.66   | 0.27   | 0.40                 |
| 90                    | 0.500            | 1.81  | 1.81   | 0.29   | 0.40                 |
| 91                    | 0.506            | 1.98  | 1.98   | 0.32   | 0.40                 |
| 92                    | 0.511            | 2.16  | 2.16   | 0.35   | 0.40                 |
| 93                    | 0.517            | 2.38  | 2.38   | 0.38   | 0.40                 |
| 94                    | 0.522            | 2.64  | 2.64   | 0.42   | 0.40                 |
| 95                    | 0.528            | 2.93  | 2.93   | 0.47   | 0.40                 |
| 96                    | 0.533            | 3.28  | 3.28   | 0.52   | 0.40                 |
| 97                    | 0.539            | 3.68  | 3.68   | 0.59   | 0.40                 |
| 98                    | 0.544            | 4.13  | 4.13   | 0.66   | 0.40                 |
| 99                    | 0.550            | 4.63  | 4.63   | 0.74   | 0.40                 |
| 100                   | 0.556            | 5.17  | 5.17   | 0.83   | 0.40                 |
| 101                   | 0.561            | 5.72  | 5.72   | 0.91   | 0.40                 |
| 102                   | 0.567            | 6.25  | 6.25   | 1.00   | 0.40                 |
| 103                   | 0.572            | 6.72  | 6.72   | 1.08   | 0.40                 |
| 104                   | 0.578            | 7.09  | 7.09   | 1.13   | 0.40                 |
| 105                   | 0.583            | 7.32  | 7.32   | 1.17   | 0.40                 |
| 106                   | 0.589            | 7.39  | 7.39   | 1.18   | 0.40                 |
| 107                   | 0.594            | 7.32  | 7.32   | 1.17   | 0.40                 |
| 108                   | 0.600            | 7.15  | 7.15   | 1.14   | 0.40                 |
| 109                   | 0.606            | 6.89  | 6.89   | 1.10   | 0.40                 |
| 110                   | 0.611            | 6.55  | 6.55   | 1.05   | 0.40                 |
| 111                   | 0.617            | 6.16  | 6.16   | 0.99   | 0.40                 |
| 112                   | 0.622            | 5.75  | 5.75   | 0.92   | 0.40                 |
| 113                   | 0.628            | 5.31  | 5.31   | 0.85   | 0.40                 |
| 114                   | 0.633            | 4.89  | 4.89   | 0.78   | 0.40                 |
| 115                   | 0.639            | 4.48  | 4.48   | 0.72   | 0.40                 |
| 116                   | 0.644            | 4.10  | 4.10   | 0.66   | 0.40                 |
| 117                   | 0.650            | 3.75  | 3.75   | 0.60   | 0.40                 |
| 118                   | 0.656            | 3.44  | 3.44   | 0.55   | 0.40                 |
| 119                   | 0.661            | 3.16  | 3.16   | 0.51   | 0.40                 |
| 120                   | 0.667            | 2.92  | 2.92   | 0.47   | 0.40                 |
| 121                   | 0.672            | 2.70  | 2.70   | 0.43   | 0.40                 |
| 122                   | 0.678            | 2.52  | 2.52   | 0.40   | 0.40                 |
| 123                   | 0.683            | 2.36  | 2.36   | 0.38   | 0.40                 |
| 124                   | 0.689            | 2.22  | 2.22   | 0.36   | 0.40                 |
| 125                   | 0.694            | 2.10  | 2.10   | 0.34   | 0.40                 |
| 126                   | 0.700            | 2.00  | 2.00   | 0.32   | 0.40                 |
| 127                   | 0.706            | 1.91  | 1.91   | 0.31   | 0.40                 |
| 128                   | 0.711            | 1.83  | 1.83   | 0.29   | 0.40                 |
| 129                   | 0.717            | 1.76  | 1.76   | 0.28   | 0.40                 |
| 130                   | 0.722            | 1.70  | 1.70   | 0.27   | 0.40                 |
| 131                   | 0.728            | 1.64  | 1.64   | 0.26   | 0.40                 |
| 132                   | 0.733            | 1.59  | 1.59   | 0.25   | 0.40                 |
| 133                   | 0.739            | 1.54  | 1.54   | 0.25   | 0.40                 |
| 134                   | 0.744            | 1.50  | 1.50   | 0.24   | 0.40                 |
| 135                   | 0.750            | 1.46  | 1.46   | 0.23   | 0.40                 |
| 136                   | 0.756            | 1.42  | 1.42   | 0.23   | 0.40                 |
| 137                   | 0.761            | 1.39  | 1.39   | 0.22   | 0.40                 |
| 138                   | 0.767            | 1.35  | 1.35   | 0.22   | 0.40                 |
| 139                   | 0.772            | 1.32  | 1.32   | 0.21   | 0.40                 |
| 140                   | 0.778            | 1.29  | 1.29   | 0.21   | 0.40                 |
| 141                   | 0.783            | 1.26  | 1.26   | 0.20   | 0.40                 |
| 142                   | 0.789            | 1.23  | 1.23   | 0.20   | 0.40                 |
| 143                   | 0.794            | 1.20  | 1.20   | 0.19   | 0.40                 |
| 144                   | 0.800            | 1.17  | 1.17   | 0.19   | 0.40                 |
| 145                   | 0.806            | 1.14  | 1.14   | 0.18   | 0.40                 |
| 146                   | 0.811            | 1.11  | 1.11   | 0.18   | 0.40                 |
| 147                   | 0.817            | 1.08  | 1.08   | 0.17   | 0.40                 |
| 148                   | 0.822            | 1.06  | 1.06   | 0.17   | 0.40                 |
| 149                   | 0.828            | 1.03  | 1.03   | 0.16   | 0.40                 |
| 150                   | 0.833            | 1.00  | 1.00   | 0.16   | 0.40                 |
| <b>r<sub>0</sub>=</b> |                  |   |  |  | <b>0.40</b>          |



## **ANEXO 5 - SIMULAÇÃO FÍSICA**





## CÁLCULOS DE REFLEXÃO – SIMULAÇÃO FÍSICA - MÉTODO DAS 2 SONDAS

**Quadro A-5 - Extracto dos valores do espectro pretendido inicial (*S*), do espectro incidente reconstituído alisado (*Si*), do espectro reflectido reconstituído alisado (*Sr*) e do coeficiente de reflexão (*r(f)*) para a simulação do Caso F1-S2-SO (*k* = 151 a 250)**

| <i>k</i>              | <i>f</i><br>(Hz) | <i>S</i><br>(*10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> .s) | <i>Si</i><br>(*10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> .s) | <i>Sr</i><br>(*10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> .s) | <i>r<sub>k</sub></i> |
|-----------------------|------------------|---|--|--|----------------------|
| 151                   | 0.503            | 3.34  | 0.48   | 0.03   | 0.35                 |
| 152                   | 0.507            | 3.52  | 0.50   | 0.03   | 0.00                 |
| 153                   | 0.510            | 3.72  | 0.60   | 0.03   | 0.83                 |
| 154                   | 0.513            | 3.93  | 0.58   | 0.03   | 0.10                 |
| 155                   | 0.517            | 4.16  | 1.25   | 0.05   | 0.40                 |
| 156                   | 0.520            | 4.41  | 1.49   | 0.05   | 0.33                 |
| 157                   | 0.523            | 4.69  | 1.61   | 0.06   | 0.15                 |
| 158                   | 0.527            | 5.00  | 1.64   | 0.06   | 0.32                 |
| 159                   | 0.530            | 5.34  | 1.70   | 0.06   | 0.17                 |
| 160                   | 0.533            | 5.71  | 1.76   | 0.06   | 0.05                 |
| 161                   | 0.537            | 6.11  | 1.93   | 0.06   | 0.37                 |
| 162                   | 0.540            | 6.54  | 2.07   | 0.10   | 0.45                 |
| 163                   | 0.543            | 7.02  | 2.26   | 0.11   | 0.03                 |
| 164                   | 0.547            | 7.52  | 1.59   | 0.10   | 0.13                 |
| 165                   | 0.550            | 8.05  | 1.34   | 0.11   | 0.07                 |
| 166                   | 0.553            | 8.61  | 1.22   | 0.09   | 0.43                 |
| 167                   | 0.557            | 9.19  | 1.60   | 0.09   | 0.24                 |
| 168                   | 0.560            | 9.78  | 2.78   | 0.17   | 0.35                 |
| 169                   | 0.563            | 10.36   | 2.76   | 0.17   | 0.67                 |
| 170                   | 0.567            | 10.92   | 2.69   | 0.19   | 0.00                 |
| 171                   | 0.570            | 11.46   | 2.56   | 0.16   | 0.06                 |
| 172                   | 0.573            | 11.94   | 2.56   | 0.16   | 0.24                 |
| 173                   | 0.577            | 12.36   | 3.40   | 0.17   | 0.29                 |
| 174                   | 0.580            | 12.70   | 3.38   | 0.16   | 0.44                 |
| 175                   | 0.583            | 12.94   | 5.81   | 0.19   | 0.40                 |
| 176                   | 0.587            | 13.08   | 5.80   | 0.20   | 0.19                 |
| 177                   | 0.590            | 13.11   | 5.10   | 0.14   | 0.16                 |
| 178                   | 0.593            | 13.06   | 5.52   | 0.16   | 0.00                 |
| 179                   | 0.597            | 12.94   | 5.44   | 0.14   | 0.11                 |
| 180                   | 0.600            | 12.76   | 5.76   | 0.14   | 0.15                 |
| 181                   | 0.603            | 12.52   | 6.37   | 0.16   | 0.15                 |
| 182                   | 0.607            | 12.22   | 5.61   | 0.17   | 0.25                 |
| 183                   | 0.610            | 11.87   | 5.65   | 0.19   | 0.18                 |
| 184                   | 0.613            | 11.49   | 3.23   | 0.16   | 0.20                 |
| 185                   | 0.617            | 11.08   | 5.25   | 0.51   | 0.19                 |
| 186                   | 0.620            | 10.64   | 5.10   | 0.90   | 0.43                 |
| 187                   | 0.623            | 10.19   | 12.03  | 6.41   | 0.70                 |
| 188                   | 0.627            | 9.74  | 11.99  | 6.41   | 0.00                 |
| 189                   | 0.630            | 9.28  | 14.18  | 8.09   | 0.39                 |
| 190                   | 0.633            | 8.83  | 14.09  | 8.56   | 0.80                 |
| 191                   | 0.637            | 8.39  | 14.40  | 8.75   | 0.86                 |
| 192                   | 0.640            | 7.96  | 14.86  | 8.75   | 0.00                 |
| 193                   | 0.643            | 7.55  | 15.06  | 8.83   | 0.80                 |
| 194                   | 0.647            | 7.16  | 12.87  | 8.47   | 0.81                 |
| 195                   | 0.650            | 6.79  | 12.96  | 8.13   | 0.68                 |
| 196                   | 0.653            | 6.44  | 6.06   | 2.71   | 0.23                 |
| 197                   | 0.657            | 6.11  | 6.19   | 2.72   | 0.61                 |
| 198                   | 0.660            | 5.81  | 4.95   | 1.07   | 0.11                 |
| 199                   | 0.663            | 5.53  | 4.22   | 0.59   | 0.29                 |
| 200                   | 0.667            | 5.27  | 3.78   | 0.37   | 0.49                 |
| 201                   | 0.670            | 5.03  | 4.12   | 0.46   | 0.26                 |
| 202                   | 0.673            | 4.81  | 3.97   | 0.40   | 0.20                 |
| 203                   | 0.677            | 4.60  | 3.75   | 0.40   | 0.69                 |
| 204                   | 0.680            | 4.42  | 3.39   | 0.35   | 0.13                 |
| 205                   | 0.683            | 4.24  | 3.10   | 0.25   | 0.36                 |
| 206                   | 0.687            | 4.09  | 3.06   | 0.26   | 0.57                 |
| 207                   | 0.690            | 3.94  | 2.25   | 0.26   | 0.33                 |
| 208                   | 0.693            | 3.81  | 2.29   | 0.28   | 0.22                 |
| 209                   | 0.697            | 3.69  | 2.83   | 0.29   | 0.32                 |
| 210                   | 0.700            | 3.58  | 2.04   | 0.19   | 0.41                 |
| 211                   | 0.703            | 3.48  | 2.04   | 0.18   | 0.31                 |
| 212                   | 0.707            | 3.39  | 2.06   | 0.18   | 0.76                 |
| 213                   | 0.710            | 3.30  | 1.80   | 0.17   | 0.14                 |
| 214                   | 0.713            | 3.22  | 1.74   | 0.15   | 0.32                 |
| 215                   | 0.717            | 3.15  | 1.70   | 0.13   | 0.44                 |
| 216                   | 0.720            | 3.08  | 1.12   | 0.08   | 0.33                 |
| 217                   | 0.723            | 3.01  | 1.22   | 0.06   | 0.21                 |
| 218                   | 0.727            | 2.95  | 0.68   | 0.05   | 0.02                 |
| 219                   | 0.730            | 2.90  | 0.73   | 0.06   | 0.15                 |
| 220                   | 0.733            | 2.84  | 0.70   | 0.05   | 0.75                 |
| 221                   | 0.737            | 2.79  | 0.67   | 0.06   | 0.29                 |
| 222                   | 0.740            | 2.74  | 0.59   | 0.06   | 0.31                 |
| 223                   | 0.743            | 2.70  | 0.50   | 0.09   | 0.39                 |
| 224                   | 0.747            | 2.65  | 0.43   | 0.09   | 0.50                 |
| 225                   | 0.750            | 2.61  | 0.53   | 0.12   | 0.66                 |
| 226                   | 0.753            | 2.57  | 0.37   | 0.12   | 0.64                 |
| 227                   | 0.757            | 2.53  | 0.35   | 0.11   | 0.63                 |
| 228                   | 0.760            | 2.49  | 0.44   | 0.25   | 0.00                 |
| 229                   | 0.763            | 2.45  | 0.63   | 0.42   | 0.58                 |
| 230                   | 0.767            | 2.42  | 0.61   | 0.41   | 0.96                 |
| 231                   | 0.770            | 2.38  | 0.97   | 0.75   | 0.00                 |
| 232                   | 0.773            | 2.34  | 0.91   | 0.73   | 0.90                 |
| 233                   | 0.777            | 2.31  | 0.91   | 0.73   | 0.90                 |
| 234                   | 0.780            | 2.28  | 0.81   | 0.69   | 0.00                 |
| 235                   | 0.783            | 2.24  | 0.79   | 0.68   | 0.96                 |
| 236                   | 0.787            | 2.21  | 0.79   | 0.68   | 0.00                 |
| 237                   | 0.790            | 2.18  | 0.60   | 0.53   | 0.33                 |
| 238                   | 0.793            | 2.15  | 0.40   | 0.36   | 0.00                 |
| 239                   | 0.797            | 2.11  | 0.42   | 0.37   | 0.00                 |
| 240                   | 0.800            | 2.08  | 0.03   | 0.02   | 0.00                 |
| 241                   | 0.803            | 2.05  | 0.04   | 0.02   | 0.00                 |
| 242                   | 0.807            | 2.02  | 0.04   | 0.03   | 0.91                 |
| 243                   | 0.810            | 1.99  | 0.04   | 0.03   | 0.62                 |
| 244                   | 0.813            | 1.96  | 0.04   | 0.03   | 0.00                 |
| 245                   | 0.817            | 1.93  | 0.06   | 0.03   | 0.89                 |
| 246                   | 0.820            | 1.90  | 0.06   | 0.03   | 0.75                 |
| 247                   | 0.823            | 1.88  | 0.05   | 0.02   | 0.38                 |
| 248                   | 0.827            | 1.85  | 0.03   | 0.02   | 0.00                 |
| 249                   | 0.830            | 1.82  | 0.03   | 0.02   | 0.59                 |
| 250                   | 0.833            | 1.79  | 0.03   | 0.01   | 0.00                 |
| <b>r<sub>o</sub>=</b> |                  |   |  |  | <b>0.56</b>          |

## CÁLCULOS DE REFLEXÃO – SIMULAÇÃO FÍSICA - MÉTODO DAS *M* SONDAS

**Quadro A-6 - Extracto dos valores do espectro pretendido inicial (*S*), do espectro incidente reconstituído alisado (*Si*), do espectro reflectido reconstituído alisado (*Sr*) e do coeficiente de reflexão (*r(f)*) para a simulação do Caso F1-S3-CO (*k* = 101 a 200)**

| <i>k</i> | <i>f</i><br>(Hz) | <i>S</i><br>(*10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> .s) | <i>Si</i><br>(*10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> .s) | <i>Sr</i><br>(*10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> .s) | <i>r<sub>k</sub></i> |
|----------|------------------|---|--|--|----------------------|
| 101      | 0.561            | 5.72  | 9.68   | 0.68   | 0.27                 |
| 102      | 0.567            | 6.25  | 10.47  | 0.62   | 0.65                 |
| 103      | 0.572            | 6.72  | 10.35  | 0.59   | 0.17                 |
| 104      | 0.578            | 7.09  | 9.11   | 0.40   | 0.17                 |
| 105      | 0.583            | 7.32  | 7.72   | 0.36   | 0.03                 |
| 106      | 0.589            | 7.39  | 7.77   | 0.34   | 0.34                 |
| 107      | 0.594            | 7.32  | 6.86   | 0.29   | 0.20                 |
| 108      | 0.600            | 7.15  | 6.93   | 0.31   | 0.74                 |
| 109      | 0.606            | 6.89  | 4.18   | 0.23   | 0.43                 |
| 110      | 0.611            | 6.55  | 3.80   | 0.23   | 0.19                 |
| 111      | 0.617            | 6.16  | 2.92   | 0.23   | 0.33                 |
| 112      | 0.622            | 5.75  | 3.05   | 0.20   | 0.47                 |
| 113      | 0.628            | 5.31  | 2.82   | 0.17   | 0.59                 |
| 114      | 0.633            | 4.89  | 2.82   | 0.17   | 0.22                 |
| 115      | 0.639            | 4.48  | 2.98   | 0.18   | 0.32                 |
| 116      | 0.644            | 4.10  | 2.65   | 0.18   | 0.08                 |
| 117      | 0.650            | 3.75  | 2.52   | 0.15   | 0.01                 |
| 118      | 0.656            | 3.44  | 2.54   | 0.13   | 0.13                 |
| 119      | 0.661            | 3.16  | 2.97   | 0.10   | 0.75                 |
| 120      | 0.667            | 2.92  | 2.79   | 0.14   | 0.25                 |
| 121      | 0.672            | 2.70  | 2.71   | 0.13   | 0.42                 |
| 122      | 0.678            | 2.52  | 2.71   | 0.19   | 0.11                 |
| 123      | 0.683            | 2.36  | 2.34   | 0.22   | 0.10                 |
| 124      | 0.689            | 2.22  | 1.79   | 0.22   | 0.18                 |
| 125      | 0.694            | 2.10  | 1.92   | 0.23   | 0.73                 |
| 126      | 0.700            | 2.00  | 1.73   | 0.25   | 0.33                 |
| 127      | 0.706            | 1.91  | 1.66   | 0.25   | 0.46                 |
| 128      | 0.711            | 1.83  | 1.74   | 0.30   | 0.55                 |
| 129      | 0.717            | 1.76  | 1.67   | 0.32   | 0.46                 |
| 130      | 0.722            | 1.70  | 1.23   | 0.30   | 0.29                 |
| 131      | 0.728            | 1.64  | 1.16   | 0.28   | 1.00                 |
| 132      | 0.733            | 1.59  | 1.07   | 0.27   | 0.88                 |
| 133      | 0.739            | 1.54  | 0.82   | 0.21   | 0.45                 |
| 134      | 0.744            | 1.50  | 0.75   | 0.19   | 0.52                 |
| 135      | 0.750            | 1.46  | 0.76   | 0.18   | 0.22                 |
| 136      | 0.756            | 1.42  | 0.91   | 0.17   | 0.92                 |
| 137      | 0.761            | 1.39  | 0.97   | 0.14   | 0.53                 |
| 138      | 0.767            | 1.35  | 0.96   | 0.13   | 0.36                 |
| 139      | 0.772            | 1.32  | 0.84   | 0.08   | 0.03                 |
| 140      | 0.778            | 1.29  | 0.92   | 0.06   | 0.26                 |
| 141      | 0.783            | 1.26  | 0.97   | 0.06   | 0.16                 |
| 142      | 0.789            | 1.23  | 0.98   | 0.04   | 0.07                 |
| 143      | 0.794            | 1.20  | 1.09   | 0.04   | 0.82                 |
| 144      | 0.800            | 1.17  | 1.17   | 0.04   | 0.11                 |
| 145      | 0.806            | 1.14  | 1.30   | 0.05   | 0.14                 |
| 146      | 0.811            | 1.11  | 1.38   | 0.05   | 0.22                 |
| 147      | 0.817            | 1.08  | 1.20   | 0.10   | 0.35                 |
| 148      | 0.822            | 1.06  | 1.15   | 0.12   | 0.18                 |
| 149      | 0.828            | 1.03  | 1.17   | 0.12   | 0.12                 |
| 150      | 0.833            | 1.00  | 1.17   | 0.15   | 0.14                 |
| 151      | 0.839            | 0.98  | 1.13   | 0.17   | 0.27                 |
| 152      | 0.844            | 0.96  | 1.02   | 0.17   | 0.74                 |
| 153      | 0.850            | 0.93  | 1.02   | 0.18   | 0.92                 |
| 154      | 0.856            | 0.91  | 0.97   | 0.19   | 0.30                 |
| 155      | 0.861            | 0.89  | 1.06   | 0.19   | 0.55                 |
| 156      | 0.867            | 0.86  | 0.93   | 0.19   | 0.44                 |
| 157      | 0.872            | 0.84  | 0.86   | 0.18   | 0.37                 |
| 158      | 0.878            | 0.82  | 0.78   | 0.12   | 0.60                 |
| 159      | 0.883            | 0.80  | 0.77   | 0.11   | 0.43                 |
| 160      | 0.889            | 0.78  | 0.80   | 0.11   | 0.07                 |
| 161      | 0.894            | 0.76  | 0.75   | 0.07   | 0.37                 |
| 162      | 0.900            | 0.74  | 0.69   | 0.05   | 0.17                 |
| 163      | 0.906            | 0.72  | 0.69   | 0.05   | 0.35                 |
| 164      | 0.911            | 0.71  | 0.71   | 0.04   | 0.45                 |
| 165      | 0.917            | 0.69  | 0.66   | 0.03   | 0.20                 |
| 166      | 0.922            | 0.67  | 0.48   | 0.05   | 0.08                 |
| 167      | 0.928            | 0.65  | 0.53   | 0.06   | 0.04                 |
| 168      | 0.933            | 0.64  | 0.46   | 0.06   | 0.32                 |
| 169      | 0.939            | 0.62  | 0.46   | 0.07   | 0.21                 |
| 170      | 0.944            | 0.61  | 0.49   | 0.07   | 0.46                 |
| 171      | 0.950            | 0.59  | 0.50   | 0.08   | 1.00                 |
| 172      | 0.956            | 0.58  | 0.46   | 0.08   | 0.55                 |
| 173      | 0.961            | 0.56  | 0.48   | 0.08   | 0.31                 |
| 174      | 0.967            | 0.55  | 0.45   | 0.08   | 0.41                 |
| 175      | 0.972            | 0.54  | 0.47   | 0.09   | 0.21                 |
| 176      | 0.978            | 0.52  | 0.45   | 0.08   | 0.44                 |
| 177      | 0.983            | 0.51  | 0.48   | 0.06   | 0.19                 |
| 178      | 0.989            | 0.50  | 0.44   | 0.04   | 0.22                 |
| 179      | 0.994            | 0.49  | 0.42   | 0.04   | 0.24                 |
| 180      | 1.000            | 0.47  | 0.42   | 0.04   | 0.34                 |
| 181      | 1.006            | 0.46  | 0.43   | 0.04   | 0.28                 |
| 182      | 1.011            | 0.45  | 0.42   | 0.03   | 0.17                 |
| 183      | 1.017            | 0.44  | 0.42   | 0.04   | 0.30                 |
| 184      | 1.022            | 0.43  | 0.36   | 0.03   | 0.51                 |
| 185      | 1.028            | 0.42  | 0.38   | 0.03   | 0.29                 |
| 186      | 1.033            | 0.41  | 0.34   | 0.04   | 0.12                 |
| 187      | 1.039            | 0.40  | 0.33   | 0.05   | 0.37                 |
| 188      | 1.044            | 0.39  | 0.36   | 0.05   | 0.31                 |
| 189      | 1.050            | 0.38  | 0.39   | 0.07   | 0.25                 |
| 190      | 1.056            | 0.37  | 0.39   | 0.06   | 0.09                 |
| 191      | 1.061            | 0.36  | 0.39   | 0.07   | 0.71                 |
| 192      | 1.067            | 0.36  | 0.40   | 0.07   | 1.00                 |
| 193      | 1.072            | 0.35  | 0.33   | 0.06   | 0.30                 |
| 194      | 1.078            | 0.34  | 0.34   | 0.06   | 0.51                 |
| 195      | 1.083            | 0.33  | 0.33   | 0.07   | 0.10                 |
| 196      | 1.089            | 0.32  | 0.32   | 0.07   | 0.45                 |
| 197      | 1.094            | 0.32  | 0.29   | 0.07   | 0.19                 |
| 198      | 1.100            | 0.31  | 0.29   | 0.06   | 1.00                 |
| 199      | 1.106            | 0.30  | 0.25   | 0.08   | 0.45                 |
| 200      | 1.111            | 0.29  | 0.20   | 0.06   | 0.36                 |

***r<sub>0</sub>* = 0.34**
















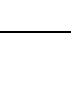
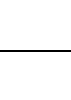
# **ANEXO 6 - LISTA DE MÓDULOS E ROTINAS SAM**



## INTRODUÇÃO






Neste anexo, são apresentadas fichas individuais relativas ao código, em linguagem de programação *G*, da quase totalidade dos módulos, sub-módulos ou outras rotinas do pacote de *software SAM*, realizado no âmbito deste trabalho. A programação em *G* foi realizada em ambiente *LabVIEW*, da *National Instruments*. A seguir, apresenta-se uma legenda referente aos diversos ícones presentes no código produzido.

## LEGENDA






| Tipo                          | Ícone   | Descrição   |
|-------------------------------|---|---|
| CONTROLOS<br>(Entrada/Input)  |    | Valor Inteiro   |
|                               |    | Valor Real  |
|                               |    | Vector Unidimensional de Valores Reais                |
|                               |   | Valor "Booleano" (Verdadeiro/Falso)                   |
|                               |  | Conjunto de caracteres ( <i>String</i> )              |
|                               |  | Caminho ( <i>path</i> ) de localização de um ficheiro |
| INDICADORES<br>(Saída/Output) |    | Valor Inteiro   |
|                               |    | Valor Real  |
|                               |    | Vector Unidimensional de Valores Reais                |
|                               |   | Valor "Booleano" (Verdadeiro/Falso)                   |
|                               |  | Conjunto de caracteres ( <i>String</i> )              |
|                               |  | Gráfico   |
|                               |  | Gráfico múltiplo                                      |
|                               |  | Caminho ( <i>path</i> ) de localização de um ficheiro |
| SUBROTINAS                    |  | Subrotina SAM com interface com o utilizador          |
|                               |  | Subrotina SAM sem interface com o utilizador          |
|                               |  | Subrotina da biblioteca LabVIEW                       |








## ÍNDICE


|   |   |     |
|---|---|-----|
|    | SAM MOD (INTERFACE).VI.....                       | 313 |
|   | Painel Principal .....                            | 313 |
|   | Controlos e Indicadores .....                     | 313 |
|   | Código LabVIEW .....                              | 315 |
|   | Lista de Subrotinas (SubVI) .....                 | 316 |
|    | SAM MOD 1 (SIMULAÇÃO NUMÉRICA).VI .....           | 318 |
|   | Painel Principal .....                            | 318 |
|   | Controlos e Indicadores .....                     | 318 |
|   | Código LabVIEW .....                              | 318 |
|   | Lista de subrotinas (SubVI) .....                 | 318 |
|  | SAM MOD 1-1 (SIMULAÇÃO BASE ESPECTRO).VI.....     | 319 |
|   | Painel Principal .....                            | 319 |
|   | Controlos e Indicadores .....                     | 319 |
|   | Código LabVIEW .....                              | 322 |
|   | Lista de Subrotinas (SubVI) .....                 | 322 |
|  | SAM MOD 1-2 (SIMULAÇÃO BASE ESPECTRO+GO).VI ..... | 324 |
|   | Painel Principal .....                            | 324 |
|   | Controlos e Indicadores .....                     | 324 |
|   | Código LabVIEW .....                              | 328 |
|   | Lista de subrotinas (SubVI) .....                 | 329 |
|  | SAM MOD 1-3 (PERFIL DADO).VI .....                | 330 |
|   | Painel Principal .....                            | 330 |
|   | Controlos e Indicadores .....                     | 330 |

---

|  |     |
|--|-----|
| Código LabVIEW .....   | 332 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....  | 333 |
|  SAM MOD 2 (AQUISIÇÃO NA ÁGUA).VI .....               | 334 |
| Painel Principal .....   | 334 |
| Controlos e Indicadores .....  | 334 |
| Código LabVIEW .....   | 336 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....  | 336 |
|  SAM MOD 3 (GERAÇÃO E AQUISIÇÃO).VI.....              | 337 |
| Painel Principal .....   | 338 |
| Controlos e Indicadores .....  | 338 |
| Código LabVIEW .....   | 340 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....  | 341 |
|  SAM MOD 4 (SIMULAÇÃO, GERAÇÃO E AQUISIÇÃO).VI..... | 342 |
| Painel Principal .....   | 342 |
| Controlos e Indicadores .....  | 342 |
| Código LabVIEW .....   | 343 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....  | 343 |
|  SAM MOD 5 (CALIBRAÇÃO DE SONDAS).VI.....           | 344 |
| Painel Principal .....   | 344 |
| Controlos e Indicadores .....  | 345 |
| Código LabVIEW .....   | 346 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....  | 346 |
|  SAM MOD 6 (CONTROLO DO BATEDOR).VI .....           | 347 |
| Painel Principal .....   | 347 |
| Controlos e Indicadores .....  | 347 |



|  |     |
|--|-----|
| Código LabVIEW .....   | 348 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....  | 349 |
|  SAM MOD 7 (ANÁLISE ESPECTRAL).VI .....                   | 350 |
| Painel Principal .....   | 350 |
| Controlos e Indicadores .....  | 350 |
| Código LabVIEW .....   | 352 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....  | 352 |
|  SAM MOD 8 (ANÁLISE DA REFLEXÃO).VI .....                 | 354 |
| Painel Principal .....   | 354 |
| Controlos e Indicadores .....  | 354 |
| Código LabVIEW .....   | 356 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....  | 357 |
|  SAM MOD 9-1 (CRIAÇÃO DE ESPECTRO EMPÍRICO).VI.....     | 358 |
| Painel Principal .....   | 358 |
| Controlos e Indicadores .....  | 358 |
| Código LabVIEW .....   | 359 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....  | 360 |
|  SAM MOD 9-2 (COMPARAÇÃO DE REGISTOS).VI .....          | 361 |
| Painel Principal .....   | 361 |
| Controlos e Indicadores .....  | 361 |
| Código LabVIEW .....   | 364 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....  | 365 |
|  SAM MOD 9-3 (DETECÇÃO DE CRISTAS EM REGISTOS).VI ..... | 366 |
| Painel Principal .....   | 366 |
| Controlos e Indicadores .....  | 366 |

|   |     |
|---|-----|
| Código LabVIEW .....  | 367 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....   | 367 |
|  SAM MOD 9-4 (CARACTERIZAÇÃO DE GRUPOS DE ONDA).VI ..... | 368 |
| Painel Principal .....  | 368 |
| Controlos e Indicadores .....   | 368 |
| Código LabVIEW .....  | 369 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....   | 370 |
| ANÁLISE HARMÓNICA.VI .....  | 371 |
| Controlos e Indicadores .....   | 371 |
| Código LabVIEW .....  | 372 |
| AUTENTICAÇÃO.VI .....   | 373 |
| Controlos e Indicadores .....   | 373 |
| Código LabVIEW .....  | 373 |
| BARTLETT.VI .....   | 374 |
| Controlos e Indicadores .....   | 374 |
| Código LabVIEW .....  | 374 |
| BIESEL-SUQUET.VI .....  | 375 |
| Controlos e Indicadores .....   | 375 |
| Código LabVIEW .....  | 375 |
| BRETSCHNEIDER-MITSUYASU.VI .....  | 376 |
| Controlos e Indicadores .....   | 376 |
| Código LabVIEW .....  | 376 |
| CÁLCULO AGRUPA (ESP).VI.....  | 377 |
| Controlos e Indicadores .....   | 377 |
| Código LabVIEW .....  | 378 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....   | 378 |
| CÁLCULOS GRUPOS ONDAS SINAL.VI .....  | 379 |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| Controlos e Indicadores .....        | 379 |
| Código LabVIEW .....                 | 380 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....    | 380 |
| COMPRIMENTO ONDA APROXIMADO.VI ..... | 381 |
| Controlos e Indicadores .....        | 381 |
| Código LabVIEW .....                 | 381 |
| COMPRIMENTO ONDA IMPLÍCITO.VI .....  | 382 |
| Controlos e Indicadores .....        | 382 |
| Código LabVIEW .....                 | 382 |
| CUIDADO COM O MÁXIMO.VI .....        | 383 |
| Controlos e Indicadores .....        | 383 |
| Código LabVIEW .....                 | 383 |
| cV (2048) A V (10).VI .....          | 384 |
| Controlos e Indicadores .....        | 384 |
| Código LabVIEW .....                 | 384 |
| DETECTAR ERROS.VI .....              | 385 |
| Controlos e Indicadores .....        | 385 |
| Código LabVIEW .....                 | 385 |
| EMQ.VI .....                         | 386 |
| Controlos e Indicadores .....        | 386 |
| Código LabVIEW .....                 | 386 |
| ENVOLVENTE REIA.VI .....             | 387 |
| Controlos e Indicadores .....        | 387 |
| Código LabVIEW .....                 | 387 |
| ENVOLVENTE RHA.VI .....              | 388 |
| Controlos e Indicadores .....        | 388 |
| Código LabVIEW .....                 | 388 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....    | 388 |

---

|   |     |
|---|-----|
| ESCALAR MODELO-PROTÓTIPO.VI .....   | 389 |
| Controlos e Indicadores .....   | 389 |
| Código LabVIEW .....  | 389 |
| ESCREVER FOLHA CÁLCULO.VI .....   | 390 |
| Controlos e Indicadores .....   | 390 |
| Código LabVIEW .....  | 391 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....   | 391 |
| ESPECTRO ALISADO.VI .....   | 392 |
| Controlos e Indicadores .....   | 392 |
| Código LabVIEW .....  | 392 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....   | 393 |
| ESPECTRO EMPÍRICO.VI .....  | 394 |
| Controlos e Indicadores .....   | 394 |
| Código LabVIEW .....  | 394 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....   | 395 |
| FICHEIRO COMANDO.VI, FICHEIRO ESPECTRO (COM).VI, FICHEIRO ESPECTRO (ESP).VI,<br>FICHEIRO ESPECTRO.VI, FICHEIRO REGISTO (INT).VI, FICHEIRO REGISTO AQUISIÇÃO<br>2D.VI, FICHEIRO REGISTO.VI ..... | 396 |
| Controlos e Indicadores .....   | 397 |
| Código LabVIEW (típico) .....   | 397 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....   | 398 |
| FUNÇÃO BESSEL (IO).VI .....   | 399 |
| Controlos e Indicadores .....   | 399 |
| Código LabVIEW .....  | 399 |
| INCOMPATIBILIDADE SONDAS.VI .....   | 400 |
| Controlos e Indicadores .....   | 400 |
| Código LabVIEW .....  | 400 |
| INDICADOR %.VI .....  | 402 |

---

---

|  |     |
|--|-----|
| Controlos e Indicadores .....                            | 402 |
| Código LabVIEW .....                                     | 402 |
| INFO.VI .....  | 403 |
| Painel Principal .....                                   | 403 |
| Controlos e Indicadores .....                            | 403 |
| Código LabVIEW .....                                     | 403 |
| INTEGRAÇÃO VELOCIDADE HORIZONTAL.VI.....                 | 404 |
| Controlos e Indicadores .....                            | 404 |
| Código LabVIEW .....                                     | 405 |
| INTERPOLAÇÃO DE VALORES.VI .....                         | 406 |
| Painel Principal .....                                   | 406 |
| Controlos e Indicadores .....                            | 406 |
| Código LabVIEW .....                                     | 407 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....                        | 407 |
| INTERPOLAÇÃO.VI .....                                    | 408 |
| Controlos e Indicadores .....                            | 408 |
| Código LabVIEW .....                                     | 408 |
| JONSWAP-GODA.VI .....                                    | 409 |
| Controlos e Indicadores .....                            | 409 |
| Código LabVIEW .....                                     | 409 |
| KH BATTJES.VI.....                                       | 410 |
| Controlos e Indicadores .....                            | 410 |
| Código LabVIEW .....                                     | 410 |
| KIMURA ESPECTRAL.VI .....                                | 411 |
| Controlos e Indicadores .....                            | 411 |
| Código LabVIEW .....                                     | 412 |
| LER FOLHA CÁLCULO.VI, LER LINHAS DE UM FICHEIRO.VI ..... | 413 |
| Controlos e Indicadores .....                            | 413 |

---

---


|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| Código LabVIEW (típico) ..... | 414 |
| LONGUET-HIGGINS.VI .....      | 415 |
| Controlos e Indicadores ..... | 415 |
| Código LabVIEW .....          | 415 |
| MOMENTOS.VI.....              | 416 |
| Controlos e Indicadores ..... | 416 |
| Código LabVIEW .....          | 417 |
| PARÂMETROS ESPECTRAIS.VI..... | 418 |
| Controlos e Indicadores ..... | 418 |
| Código LabVIEW .....          | 419 |
| PARÂMETROS GO.VI.....         | 420 |
| Controlos e Indicadores ..... | 420 |
| Código LabVIEW .....          | 421 |
| PERFIL DISTANTE.VI.....       | 422 |
| Controlos e Indicadores ..... | 422 |
| Código LabVIEW .....          | 423 |
| PM-GEN.VI.....                | 424 |
| Controlos e Indicadores ..... | 424 |
| Código LabVIEW .....          | 424 |
| PM-ITTC.VI .....              | 425 |
| Controlos e Indicadores ..... | 425 |
| Código LabVIEW .....          | 425 |
| PREPARAR SINAL.VI .....       | 426 |
| Controlos e Indicadores ..... | 426 |
| Código LabVIEW .....          | 426 |
| SEPARAÇÃO.VI .....            | 427 |
| Controlos e Indicadores ..... | 427 |
| Código LabVIEW .....          | 428 |

---

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ONDAS.VI ..... | 431 |
| Controlos e Indicadores .....        | 431 |
| Código LabVIEW .....                 | 431 |
| Lista de subrotinas (SubVI) .....    | 432 |
| SINAL NO BATEDOR.VI .....            | 433 |
| Controlos e Indicadores .....        | 433 |
| Código LabVIEW .....                 | 433 |

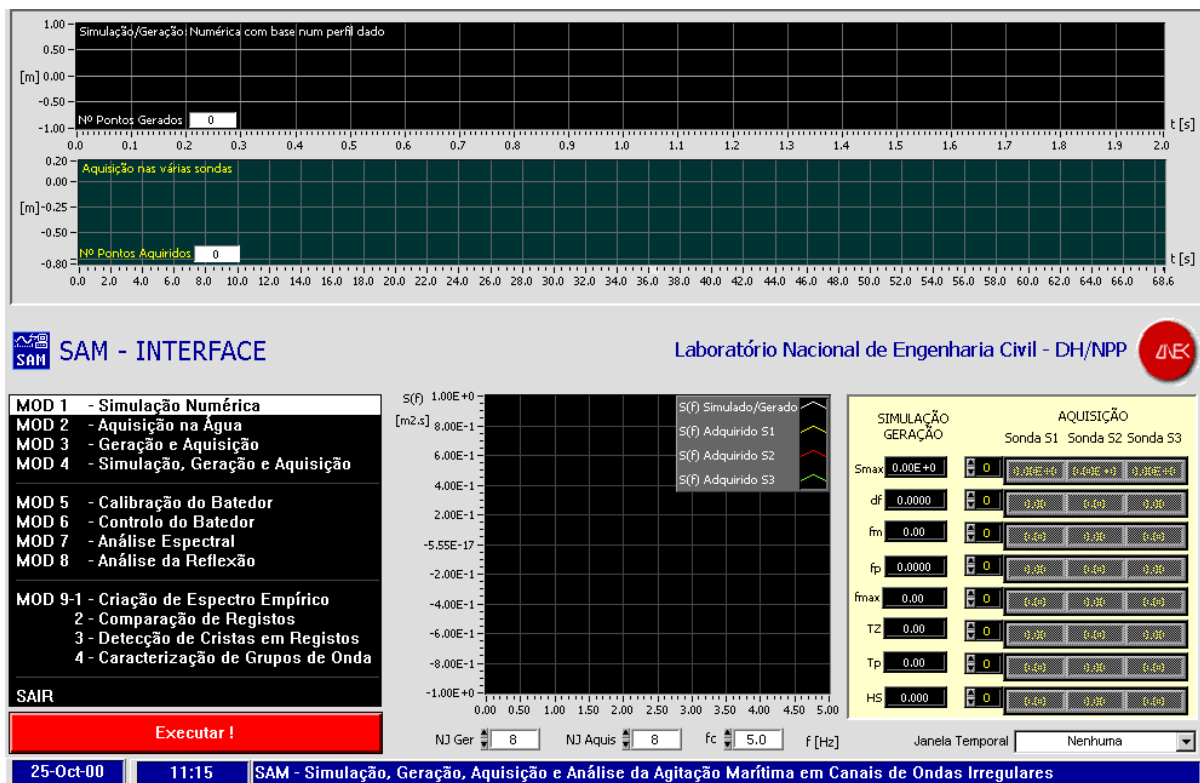




 **SAM MOD (INTERFACE).VI**

Módulo de Interface com o utilizador do pacote geral SAM - Simulação da Agitação Marítima.

**PAINEL PRINCIPAL**



**CONTROLOS E INDICADORES**



**df** Intervalo entre frequências dos espectros simulado/gerado e adquiridos, em Hz. Utilizam-se N/2 frequências harmónicas para que a frequência correspondente a N/2 não ultrapasse a Frequência de Nyquist.



**Espectros Gerado e Adquirido** Representação gráfica dos espectros gerado e adquiridos nas diversas sondas. O tipo de alisamento destes espectros é controlado pelos controles NJGer, NJAquis, e Janela Temporal, em baixo.

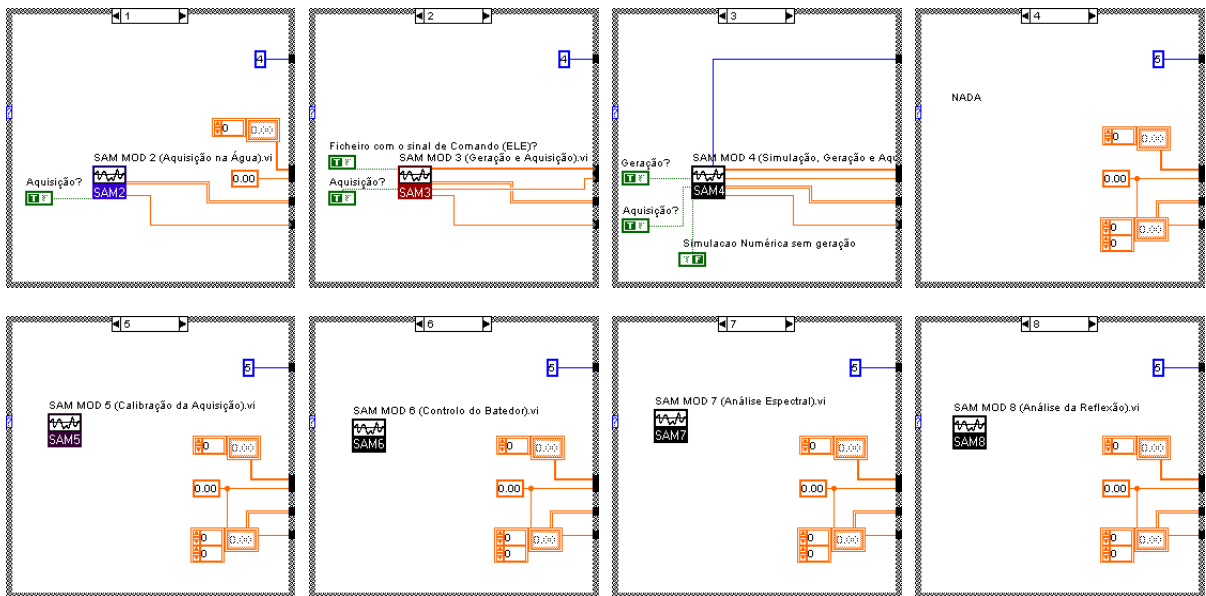
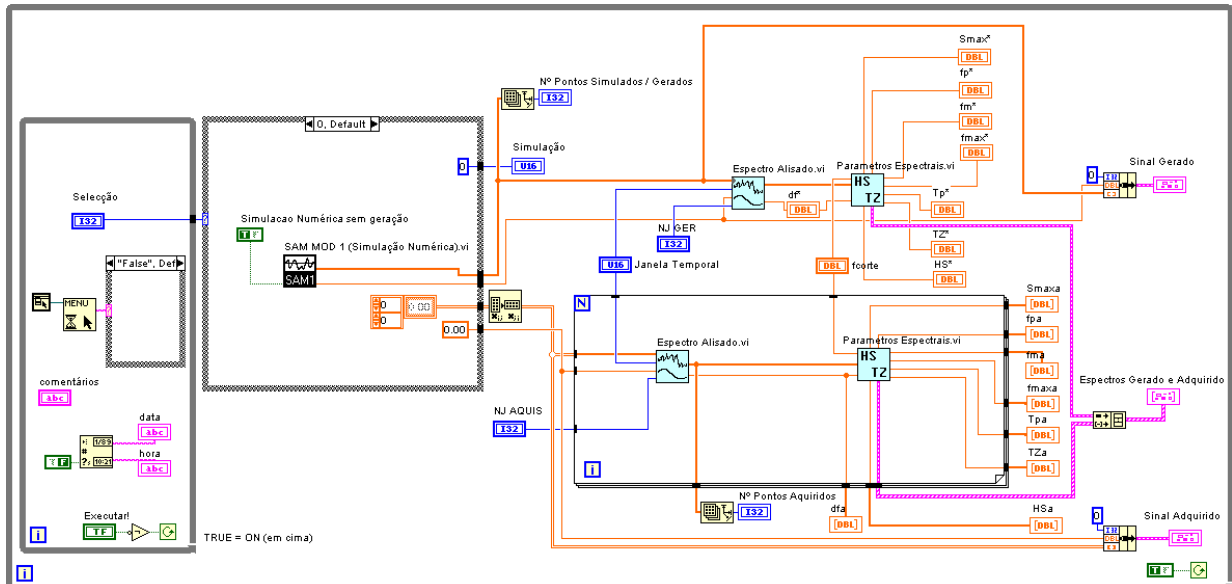


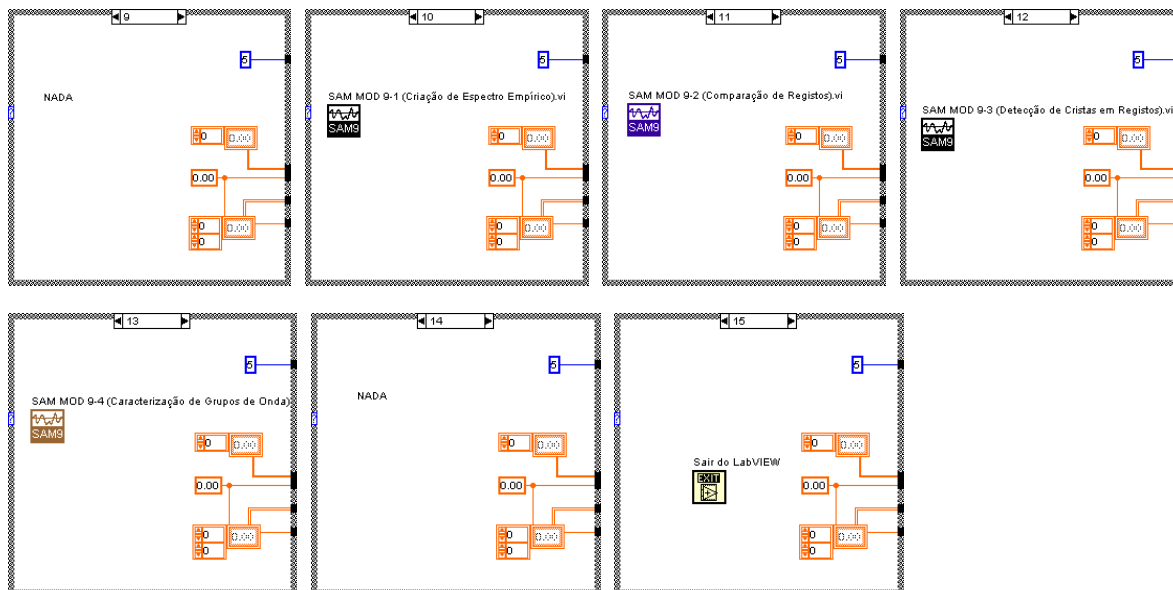
**Executar!** Botão que permite executar o módulo seleccionado acima.

- [DBL]** **fc** Frequência de corte ou máxima na representação gráfica dos espectros, em Hertz ou ciclos/segundo. Em sinais da natureza, é costume considerar-se  $fc=0.5$  Hz, ao passo que à escala do canal (1/50) é costume usar-se  $fc=2$  Hz. Por outro lado,  $fc \leq f_{max}$ .
- [DBL]** **fm** Frequência mediana calculada através dos espectros simulado/gerado e adquiridos, em Hz.  
OBS: Neste painel estão previstas apenas 3 sondas de aquisição (S1, S2 e S3). Se houver mais, até ao máximo de 8, alargar os campos com o rato, se necessário.
- [DBL]** **fmax** Frequência máxima que os sinais poderão exibir, frequência de Nyquist.  
OBS: Neste painel estão previstas apenas 3 sondas de aquisição (S1, S2 e S3). Se houver mais, até ao máximo de 8, alargar os campos com o rato, se necessário.
- [DBL]** **fp** Frequência de pico dos espectros simulado/gerado e adquiridos, isto é, as frequências que correspondem às máximas ordenadas dos espectros, em Hz.  
OBS: Neste painel estão previstas apenas 3 sondas de aquisição (S1, S2 e S3). Se houver mais, até ao máximo de 8, alargar os campos com o rato, se necessário.
- [DBL]** **HS** Altura significativa calculada dos espectros simulado/gerado e adquiridos, em metros.  
OBS: Neste painel estão previstas apenas 3 sondas de aquisição (S1, S2 e S3). Se houver mais, até ao máximo de 8, alargar os campos com o rato, se necessário.
- [U16]** **Janela Temporal** Filtro utilizado para análise espectral dos sinais temporais.
- [I32]** **NJ AQUIS** Nº de pontos da semi-janela de Bartlett (triangular) considerada no alisamento dos espectros obtidos por aquisição. O espectro alisado é calculado através de uma média móvel de  $2*NJ+1$  pontos, ponderada triangularmente, e centrada no ponto de cálculo.
- [I32]** **NJ GER** Nº de pontos da semi-janela de Bartlett (triangular) considerada no alisamento do espectro simulado/gerado. O espectro alisado é calculado através de uma média móvel de  $2*NJ+1$  pontos, ponderada triangularmente, e centrada no ponto de cálculo.
- [I32]** **Nº Pontos Adquiridos** Número de pontos adquiridos nas diversas sondas.
- [I32]** **Nº Pontos Simulados / Gerados** Nº de pontos do registo.
- [I32]** **Seleção** Selector principal do módulo de interface. Permite escolher um dos diversos módulos constituintes do pacote de *software* SAM.
- [F71]** **Sinal Adquirido** Sinal Adquirido na água pelas diversas sondas colocadas no canal ou tanque. Actualmente, a placa de aquisição de dados permite adquirir 8 canais simultaneamente, correspondentes a igual número de sondas. As sondas tomam a designação de S1, S2, S3 ...
- [F71]** **Sinal Gerado** Sinal Simulado e/ou Gerado pelo batedor de ondas, em m.
- [DBL]** **Smax** Máxima ordenada dos espectros simulado/gerado e adquiridos nas diversas sondas, em  $m^2/Hz$ .  
OBS: Neste painel estão previstas apenas 3 sondas de aquisição (S1, S2 e S3). Se houver mais, até ao máximo de 8, alargar os campos com o rato, se necessário.
- [DBL]** **Tp** Período do pico dos espectros simulado/gerado e adquiridos, em segundos.

OBS: Neste painel estão previstas apenas 3 sondas de aquisição (S1, S2 e S3). Se houver mais, até ao máximo de 8, alargar os campos com o rato, se necessário.

## CÓDIGO LABVIEW





## LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)



Espectro Alisado.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Espectro Alisado.vi



Info.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Info.vi



Parâmetros Espectrais.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Parâmetros Espectrais.vi



SAM MOD 1 (Simulação Numérica).vi  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 1 (Simulação Numérica).vi



SAM MOD 2 (Aquisição na Água).vi  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 2 (Aquisição na Água).vi



SAM MOD 3 (Geração e Aquisição).vi  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 3 (Geração e Aquisição).vi



SAM MOD 4 (Simulação, Geração e Aquisição).vi  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 4 (Simulação, Geração e Aquisição).vi



SAM MOD 5 (Calibração de Sondas).vi  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 5 (Calibração de Sondas).vi



SAM MOD 6 (Controlo do Batedor).vi  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 6 (Controlo do Batedor).vi



SAM MOD 7 (Análise Espectral).vi  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 7 (Análise Espectral).vi



SAM MOD 8 (Análise da Reflexão).vi  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 8 (Análise da Reflexão).vi



SAM MOD 9-1 (Criação de Espectro Empírico).vi  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 9-1 (Criação de Espectro Empírico).vi



SAM MOD 9-2 (Comparação de Registos).vi  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 9-2 (Comparação de Registos).vi



SAM MOD 9-3 (Detecção de Cristas em Registos).vi  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 9-3 (Detecção de Cristas em Registos).vi

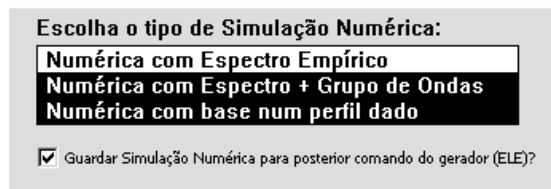


SAM MOD 9-4 (Caracterização de Grupos de Onda).vi  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 9-4 (Caracterização de Grupos de Onda).vi

## SAM MOD 1 (SIMULAÇÃO NUMÉRICA).VI



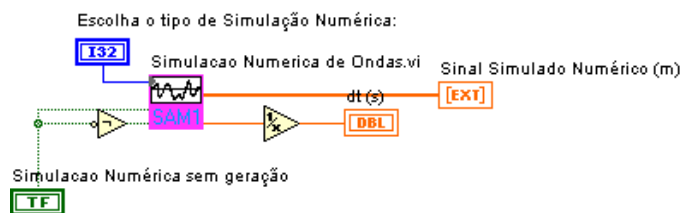
### PAINEL PRINCIPAL




### CONTROLOS E INDICADORES

- I32** Escolha o tipo de Simulação Numérica Escolha do método de simulação numérica para, eventualmente, produzir agitação na água. Os métodos existentes são:
- 1- Espectro - Método da Fase Aleatória
  - 2- Espectro + Grupos de Ondas - Método da Escalagem
  - 3- Perfil Dado - Método da integração da velocidade horizontal

### CÓDIGO LABVIEW



### LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)

-  Simulação Numérica de Ondas.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Simulação Numérica de Ondas.vi

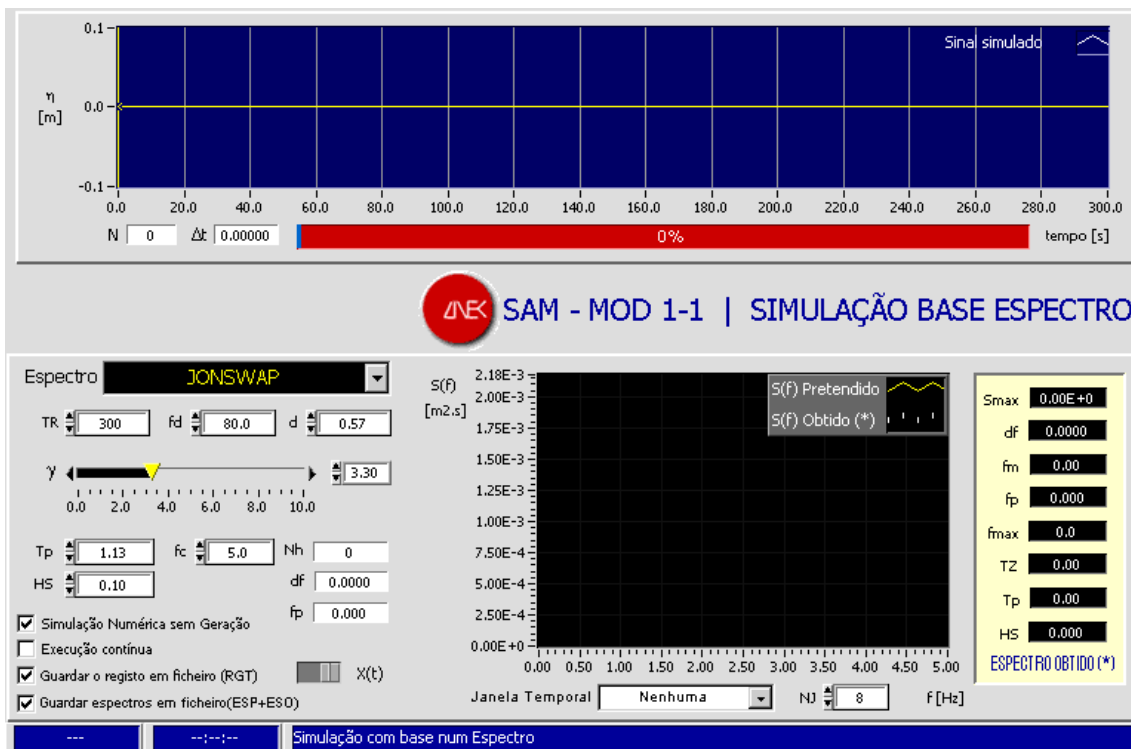


## SAM MOD 1-1 (SIMULAÇÃO BASE ESPECTRO).VI

Sub-módulo do Módulo 1 - Geração Numérica de Sinais na Água, dado um espectro empírico.



### PAINEL PRINCIPAL



### CONTROLOS E INDICADORES

**DBL**  $\gamma$  Parâmetro do espectro JONSWAP-Goda.

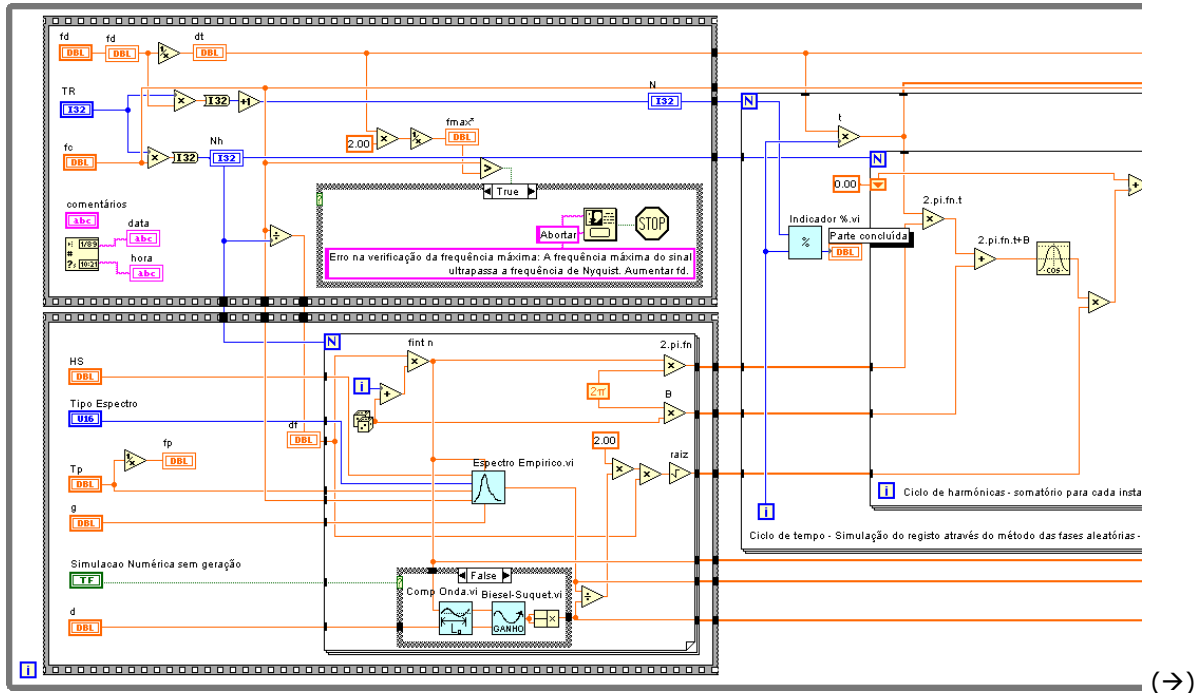
**DBL**  $d$  Profundidade da água no canal, em metros.  
OBS: Este parâmetro só é importante quando se pretende, para além da simulação numérica, a geração física.

- DBL** **df** Intervalo entre frequências do espectro simulado/pretendido, em Hz. Utilizam-se N/2 frequências harmônicas para que a frequência correspondente a N/2 não ultrapasse a Frequência de Nyquist.
- DBL** **df\*** Intervalo entre frequências do espectro obtido, em Hz. Utilizam-se N/2 frequências harmônicas para que a frequência correspondente a N/2 não ultrapasse a Frequência de Nyquist.
- DBL** **dt** Intervalo de tempo entre observações.
- U16** **Espectro** Tipo de espectro empírico a utilizar para a simulação numérica do sinal:  
 1- JONSWAP-Goda ( $\gamma$ , HS, Tp);  
 2- Pierson-Moskowitz GENERALIZADO (HS);  
 3- Pierson-Moskowitz ITTC (HS, Tp);  
 4- Somente ruído branco;
- FFT** **Espectros** Representação gráfica dos espectros pretendido (simulado), com as características introduzidas pelo utilizador, e do espectro obtido após utilização da Transformada Rápida de Fourier (FFT) do sinal simulado. As ordenadas deste espectro poderão ser guardadas, juntamente com as ordenadas do espectro pretendido (espectro empírico), em ficheiros ESP e ESO, respectivamente.
- TF** **Execução contínua** Botão de ciclo para execução contínua.
- DBL** **fc** Frequência de corte, ou máxima, do espectro do sinal simulado.
- DBL** **fd** Frequência de digitalização do sinal simulado, inverso do intervalo entre observações ( $= 1/dt$ ), em Hertz ou ciclos/segundo. Deve satisfazer-se a seguinte condição:  $fd > 2*f_{max}$ , sendo  $f_{max}$  a frequência máxima presente no sinal. Em sinais da natureza, é costume considerar-se  $f_{max}=0.5$  Hz, ao passo que à escala do canal (1/50) é costume usar-se  $f_{max}=2$  Hz.
- DBL** **fm\*** Frequência mediana calculada através do espectro obtido, em Hz.
- DBL** **fmax\*** Frequência máxima que o sinal obtido pode exibir, frequência de Nyquist.
- DBL** **fp** Frequência de pico do espectro pretendido, a frequência que corresponde à máxima ordenada do espectro empírico, em Hz.
- DBL** **fp\*** Frequência de pico do espectro obtido, a frequência que corresponde à máxima ordenada do espectro, em Hz.
- TF** **Guardar espectros em ficheiro** Selector que possibilita guardar as ordenadas do espectro empírico e do espectro obtido após TF, num ficheiro, geralmente com extensões, respectivamente, ESP e ESO.
- TF** **Guardar o registo em ficheiro (RGT)** Selector que possibilita guardar ou não os valores do registo simulado (uma coluna com as elevações ou duas colunas - tempo e elevação), num ficheiro geralmente de extensão RGT.
- DBL** **HS** Altura significativa pretendida, em metros.
- DBL** **HS\*** Altura significativa calculada do espectro obtido através da fórmula  $4*\sqrt{m0}$ , em metros.
- U16** **Janela Temporal** Filtro utilizado para análise espectral dos sinais temporais.

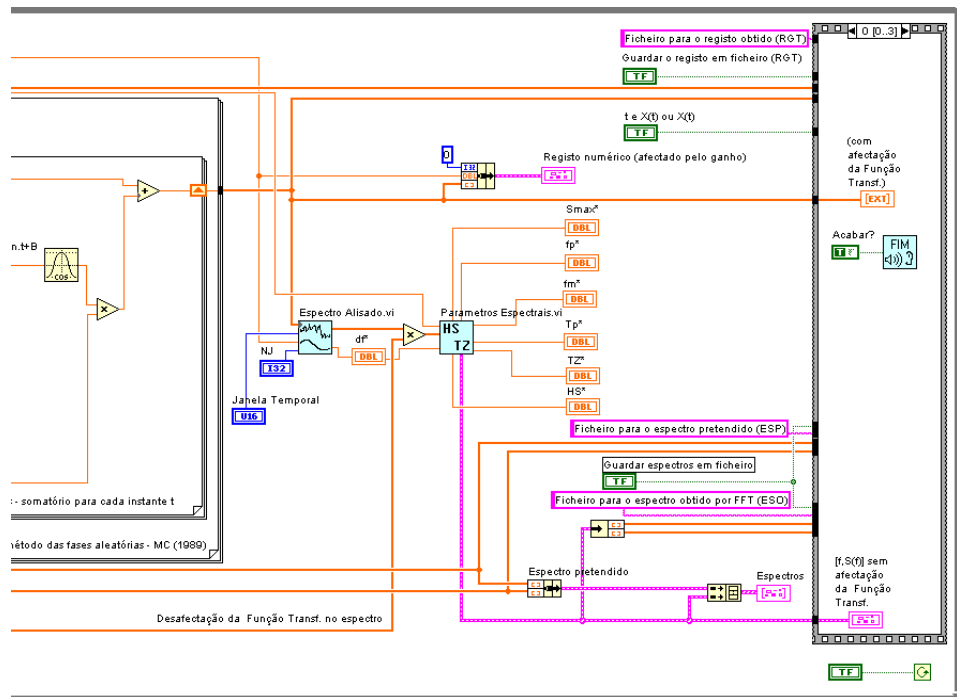


- I32** N Nº de pontos do registo numérico simulado.
- I32** Nh Nº de sinusóides de definição do espectro.
- I32** NJ Nº de pontos da semi-janela de Bartlett (triangular) considerada no alisamento do espectro obtido. O espectro alisado é calculado através de uma média móvel de  $2 \cdot NJ + 1$  pontos, ponderada triangularmente, e centrada no ponto de cálculo.
- DBL** **Parte concluída** Indicador da parte concluída da simulação do sinal numérico.
- FTB** **Registo numérico (afectado pelo ganho)** Representação gráfica do sinal no tempo simulado numericamente com base num espectro empírico de características indicadas na parte inferior do painel.
- TF** **Simulação Numérica sem geração** Selector de Simulação Numérica apenas, sem geração. Com esta opção, o sinal não é afectado por qualquer função de transferência devida ao batedor.
- DBL** **Smax\*** Máxima ordenada do espectro obtido, em  $m^2/Hz$ .
- TF** **t e X(t) ou X(t)** Selector do tipo de ficheiro que contém o registo das elevações: com duas colunas [ t e X(t) ] ou uma única coluna com X(t)
- DBL** **Tp** Período de pico do espectro empírico (pretendido), em segundos.
- DBL** **Tp\*** Período do pico do espectro obtido, em segundos.
- I32** **TR** Duração total dos registos, em segundos.
- DBL** **TZ\*** Período médio de zero ascendente calculado através do espectro obtido, em segundos.

## CÓDIGO LABVIEW



(→)



(←)

## LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)



Biesel-Suquet.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Biesel-Suquet.vi



Comprimento Onda Aproximado.vi  
 C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Comprimento Onda Aproximado.vi



Espectro Alisado.vi  
 C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Espectro Alisado.vi



Espectro Empírico.vi  
 C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Espectro Empírico.vi



Ficheiro Espectro.vi  
 C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ficheiro Espectro.vi



Ficheiro Registo.vi  
 C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ficheiro Registo.vi



Indicador %.vi  
 C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Indicador %.vi



Parâmetros Espectrais.vi  
 C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Parâmetros Espectrais.vi

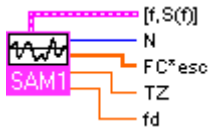


Sinal de acabar.vi  
 C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Sinal de acabar.vi

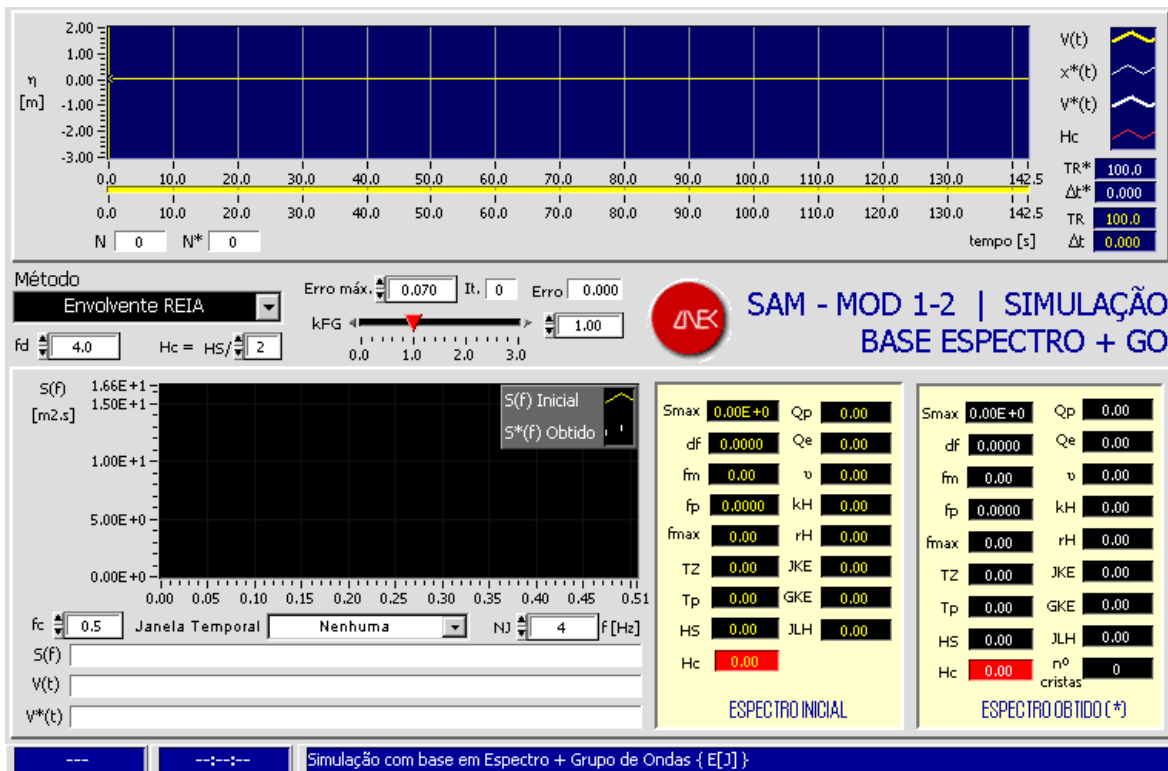


## SAM MOD 1-2 (SIMULAÇÃO BASE ESPECTRO+GO).VI

Sub-módulo do Módulo 1 de Simulação Numérica de Sinais, dado um espectro empírico um parâmetro de grupo de ondas.



### PAINEL PRINCIPAL



### CONTROLOS E INDICADORES



v Parâmetro adimensional de Longuet-Higgins, 1984, obtido a partir do espec-

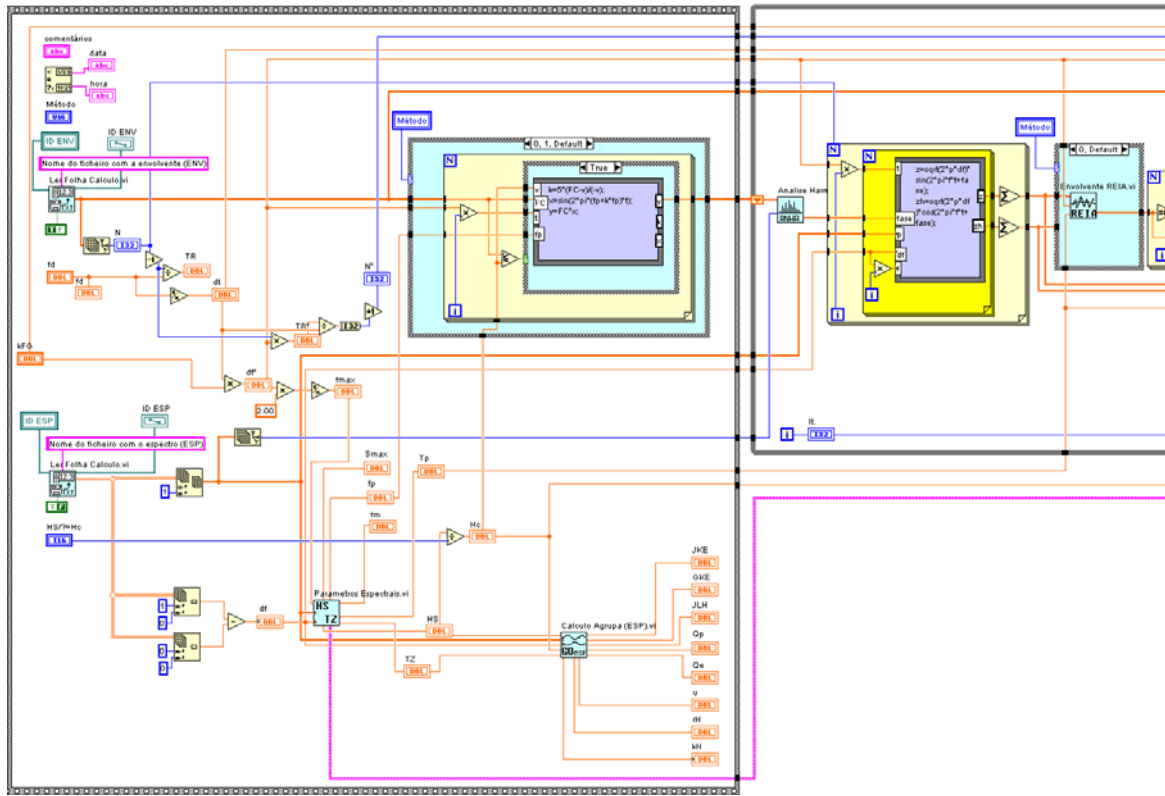
tro inicial, que mede a largura espectral. Quanto menor o valor de  $v$ , mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamento de ondas existe.

- DBL**  $v^*$  Parâmetro adimensional de Longuet-Higgins, 1984, obtido após escalagem.
- DBL** **df** Intervalo entre frequências do espectro inicial, em Hz. Utilizam-se  $N/2$  frequências harmônicas para que a frequência correspondente a  $N/2$  não ultrapasse a Frequência de Nyquist.
- DBL** **df\*** Intervalo entre frequências do espectro obtido após escalagem, em Hz. Utilizam-se  $N/2$  frequências harmônicas para que a frequência correspondente a  $N/2$  não ultrapasse a Frequência de Nyquist.
- DBL** **dt** Intervalo de tempo entre observações da envolvente inicial,  $V(t)$ .
- DBL** **dt\*** Intervalo de tempo entre observações da envolvente escalada,  $V^*(t)$ .
- DBL** **Erro** Desvio médio quadrático, na actual iteração, entre a envolvente actual e a envolvente inicial dada.
- DBL** **Erro máx.** Desvio médio quadrático máximo admissível nos mínimos quadrados entre a envolvente da presente iteração e a envolvente inicial dada.
- FIG** **Espectros Inicial e Obtido** Representação gráfica do espectro inicial  $[S(f)]$  pretendido, determinado do ficheiro dado, e do espectro obtido  $[S^*(f)]$  por FFT e após escalagem.
- DBL** **fc** Frequência de corte ou máxima na representação gráfica dos espectros, em Hertz ou ciclos/segundo. Em sinais da natureza, é costume considerar-se  $fc=0.5$  Hz, ao passo que à escala do canal (1/50) é costume usar-se  $fc=2$  Hz. Por outro lado,  $fc \leq f_{max}$ .
- DBL** **fd** Frequência de digitalização, inverso do intervalo entre observações ( $= 1/dt$ ), em Hertz ou ciclos/segundo. Deve satisfazer-se a seguinte condição:  $fd > 2 \cdot f_{max}$ , sendo  $f_{max}$  a frequência máxima presente no sinal.
- DBL** **fm** Frequência mediana calculada através do espectro inicial, em Hz.
- DBL** **fm\*** Frequência mediana calculada através do espectro obtido após escalagem, em Hz.
- DBL** **fmax** Frequência máxima que o sinal inicial poderá exibir, frequência de Nyquist.
- DBL** **fmax\*** Frequência máxima que o sinal obtido após escalagem poderá exibir, frequência de Nyquist.
- DBL** **fp** Frequência de pico do espectro inicial, a frequência que corresponde à máxima ordenada do espectro, em Hz.
- DBL** **fp\*** Frequência de pico do espectro obtido após escalagem.
- FIG** **Funções envolventes inicial e escalada e sinal simulado escalado** Representação gráfica temporal das seguintes funções:  
 1 - Envolvente REIA ou RHA, ou Registo REG, dado,  $V(t)$ ;  
 2 - Altura de onda limite (constante) do agrupamento de ondas,  $H_c$  - "threshold wave height = 2 x threshold level";  
 3 - Para cada iteração, sinal simulado da elevação da água,  $x^*(t)$ , calculado por método semelhante ao SIWEH de F&M, 1979;  
 4 - Para cada iteração, envolvente do sinal calculado em 3,  $V^*(t)$ , calculado pelo mesmo método.

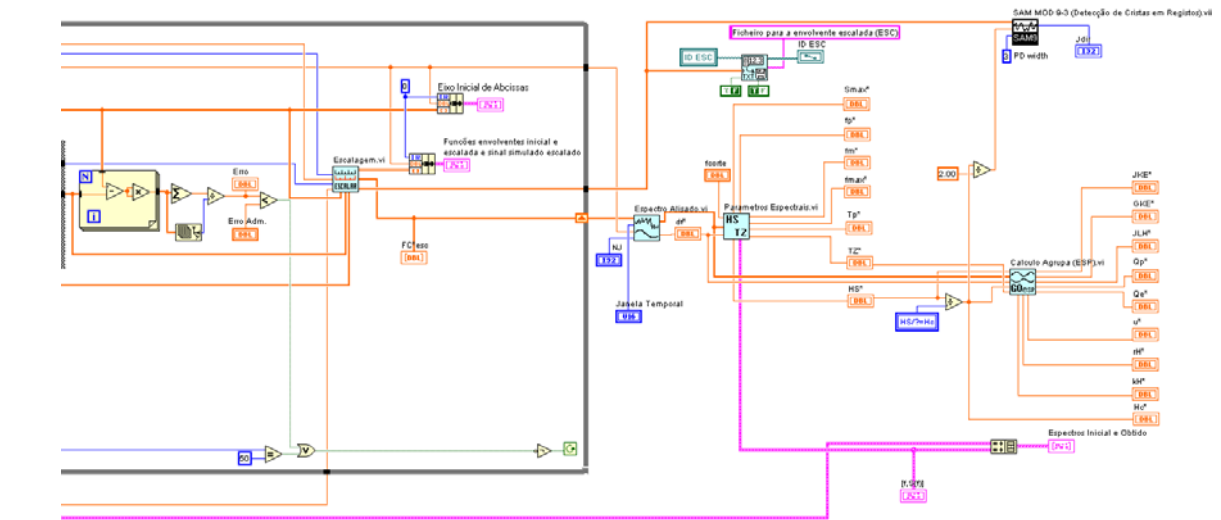
- DBL** **GKE** Número médio de ondas entre cada início de grupos de ondas da envolvente inicial (chorrilho total) utilizando a teoria Kimura Espectral, Kimura, 1980, Battjes e Vledder, 1984.
- DBL** **GKE\*** Número médio de ondas entre cada início de grupos de ondas após escalagem (chorrilho total) utilizando a teoria Kimura Espectral, Kimura, 1980, Battjes e Vledder, 1984.
- DBL** **Hc** Altura de onda correspondente ao nível de grupo de ondas considerado, v, em m.
- DBL** **Hc\*** Altura de onda correspondente ao nível de grupo de ondas considerado, obtida após escalagem, em m.
- DBL** **HS** Altura significativa calculada do espectro inicial através da fórmula  $4\sqrt{m_0}$ , em metros.
- DBL** **HS\*** Altura significativa calculada do espectro obtido após escalagem.
- I16** **HS/?=Hc** Nível de grupo de ondas, expresso em partes de altura significativa, isto é, o denominador do nível de agrupamento de ondas utilizado, sendo que o numerador é HS.
- DBL** **ID ENV** Nome do ficheiro que contém a envolvente dada, V(t).
- DBL** **ID ESC** Nome do ficheiro que contém a envolvente, V\*(t), do novo sinal iterado.
- DBL** **ID ESP** Nome do ficheiro que contém as frequências e ordenadas do espectro dados. Notar que este ficheiro deve conter 2 colunas, f e S(f), "tab delimited".
- I32** **It.** Nº da iteração actual.
- U16** **Janela Temporal** Filtro utilizado para análise espectral dos sinais temporais.
- I32** **Jdir** Número de cristas acima do nível v.
- DBL** **JKE** Número médio de ondas nos grupos de ondas da envolvente inicial utilizando o método de Kimura Espectral, Kimura, 1980, Battjes e Vledder, 1984.
- DBL** **JKE\*** Número médio de ondas nos grupos de ondas após escalagem.
- DBL** **JLH** Valor de E[J] da envolvente inicial, obtido pela fórmula de Longuet-Higgins, 1984. Varia com o nível v (ou Hc) considerado.
- DBL** **JLH\*** Valor de E[J] após escalagem.
- DBL** **kFG** Selector de aumento ou diminuição do parâmetro de grupo de onda considerado - E[J]. Sendo o parâmetro inicial = a e o parâmetro pretendido com a simulação = b, o valor da Redução/Ampliação será o cociente b/a.
- DBL** **KH** Parâmetro adimensional, calculado a partir do sinal inicial, devido a Battjes, 1974, e Battjes e Vledder, 1984, que mede a largura do espectro. Este parâmetro é importante no cálculo de p22 da teoria de Kimura Espectral, 1980, e está relacionado com o coeficiente de correlação entre ondas sucessivas, rH.
- DBL** **kH\*** Parâmetro adimensional, calculado a partir do sinal final, devido a Battjes, 1974, e Battjes e Vledder, 1984.

- U16** **Método** Selector que possibilita:  
 1 - REIA: Simulação de um sinal dados o Espectro Sini(f) e a Envolvente REIA,  
 2 - RHA: Simulação de um sinal dados o Espectro Sini(f) e a Envolvente RHA (através da Transformada de Hilbert).  
 3 - REG: Simulação de um sinal dados o Espectro Sini(f) e um registo qualquer REG.
- I32** N N° de pontos da envolvente inicial.
- I32** N\* N° de pontos da envolvente escalada.
- I32** NJ N° de pontos da semi-janela de Bartlett (triangular) considerada no alisamento do espectro obtido. O espectro alisado é calculado através de uma média móvel de  $2*NJ+1$  pontos, ponderada triangularmente, e centrada no ponto de cálculo.
- DBL** **Qe** Parâmetro espectral, calculado a partir do espectro inicial, de Medina e Hudspeth, 1987, baseado em  $Q_p$ , de Goda, 1970, o qual dá uma medida da largura espectral. Quanto maior o valor de  $Q_e$ , mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamento de ondas existe.
- DBL** **Qe\*** Parâmetro espectral, calculado a partir do espectro final, de Medina e Hudspeth, 1987, baseado em  $Q_p$ , de Goda, 1970, o qual dá uma medida da largura espectral. Quanto maior o valor de  $Q_e$ , mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamento de ondas existe.
- DBL** **Qp** Parâmetro espectral de Goda, 1970, calculado a partir do espectro inicial. Dá uma medida da largura espectral. Quanto maior o valor de  $Q_p$ , mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamentos de ondas existem.
- DBL** **Qp\*** Parâmetro espectral de Goda, 1970, calculado a partir do espectro final. Dá uma medida da largura espectral. Quanto maior o valor de  $Q_p$ , mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamentos de ondas existem.
- DBL** **rH** Aproximação do coeficiente de correlação entre ondas sucessivas, devida a Battjes, 1974, unicamente através do uso de informação espectral do sinal inicial.
- DBL** **rH\*** Aproximação do coeficiente de correlação entre ondas sucessivas, devida a Battjes, 1974, unicamente através do uso de informação espectral do sinal obtido após escalagem.
- DBL** **Smax** Máxima ordenada do espectro inicial, em  $m^2/Hz$ .
- DBL** **Smax\*** Máxima ordenada do espectro obtido após escalagem, em  $m^2/Hz$ .
- DBL** **Tp** Período do pico do espectro obtido, em segundos.
- DBL** **Tp\*** Período do pico do espectro obtido após escalagem, em segundos.
- DBL** **TR** Duração total da envolvente inicial,  $V(t)$ , em segundos.
- DBL** **TR\*** Duração total da envolvente escalada,  $V^*(t)$ , em segundos.
- DBL** **TZ** Período médio de zero ascendente calculado através do espectro inicial, em segundos.
- DBL** **TZ\*** Período médio de zero ascendente calculado através do espectro obtido após escalagem, em segundos.

# CÓDIGO LABVIEW



(→)



(←)



## LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)



Analise Harmónica.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Analise Harmónica.vi



Cálculo Agrupa (ESP).vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Cálculo Agrupa (ESP).vi



Envolverte REIA.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Envolverte REIA.vi



Envolverte RHA.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Envolverte RHA.vi



Escalagem.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Escalagem.vi



Escrever Folha Cálculo.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Escrever Folha Cálculo.vi



Espectro Alisado.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Espectro Alisado.vi



Ler Folha Cálculo.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ler Folha Cálculo.vi



Parâmetros Espectrais.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Parâmetros Espectrais.vi

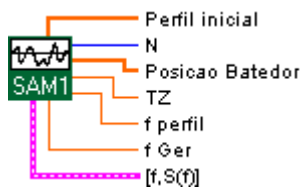


SAM MOD 9-3 (Detecção de Cristas em Registos).vi  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 9-3 (Detecção de Cristas em Registos).vi

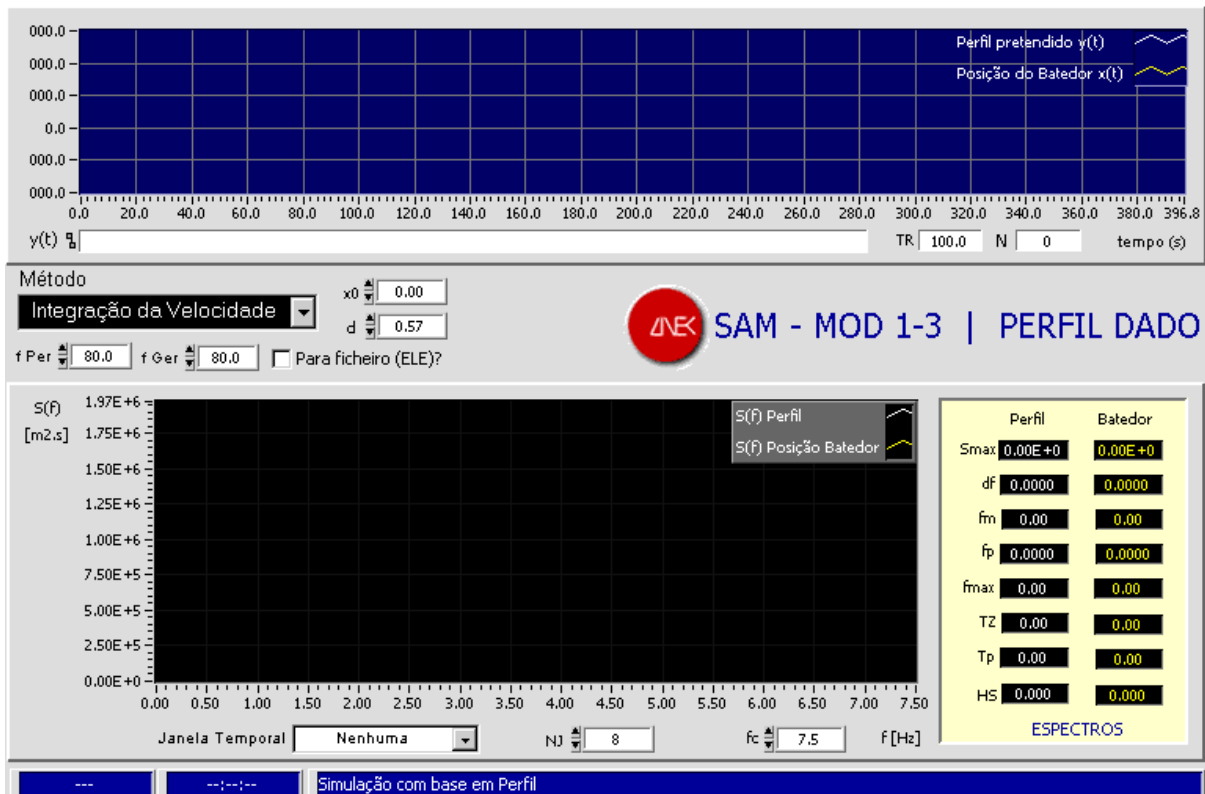


## SAM MOD 1-3 (PERFIL DADO).VI

Sub-módulo do Módulo 1 de Simulação Numérica de Sinais, dado um registo com um perfil pretendido. Neste sub-módulo gera-se na água um sinal com um perfil da superfície da água pré-especificado. Utiliza-se, para isso, o Método da Integração da Velocidade Horizontal.



### PAINEL PRINCIPAL













### CONTROLOS E INDICADORES

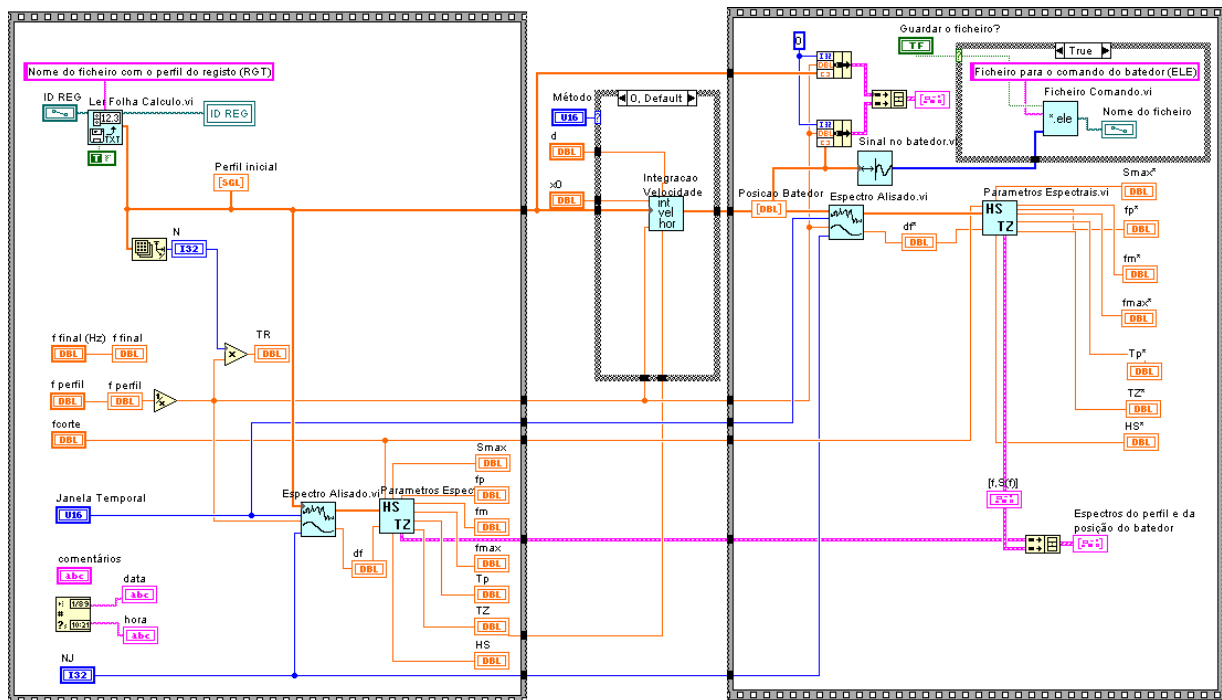
**DBL** d Profundidade do canal onde se pretende o perfil dado, em metros.

- DBL** **df** Intervalo entre frequências do espectro do perfil pretendido, em Hz. Utilizam-se  $N/2$  frequências harmônicas para que a frequência correspondente a  $N/2$  não ultrapasse a frequência de Nyquist.
- DBL** **df\*** Intervalo entre frequências do espectro da posição do batedor, em Hz. Utilizam-se  $N/2$  frequências harmônicas para que a frequência correspondente a  $N/2$  não ultrapasse a frequência de Nyquist.
- [F:]** **Espectros do perfil e da posição do batedor** Representação gráfica dos espectros do perfil,  $y(t)$ , e da posição do batedor,  $x(t)$ .
- DBL** **f Ger** Apenas quando se pretende ver o perfil gerado na água, a frequência do sinal a gerar, com base no perfil dado. Se o sinal do perfil ( $f$  Per) tiver uma frequência diferente, será necessário fazer interpolação/extrapolação.
- DBL** **f Per** Frequência do sinal do perfil dado. Caso o sinal a gerar ( $f$  Ger) tenha uma frequência diferente, será necessário fazer interpolação/extrapolação.
- DBL** **fc** Frequência de corte ou máxima na representação gráfica dos espectros, em Hertz ou ciclos/segundo. Em sinais da natureza, é costume considerar-se  $fc=0.5$  Hz, ao passo que à escala do canal (1/50) é costume usar-se  $fc=2$  Hz. Por outro lado,  $fc \leq f_{max}$ .
- DBL** **fm** Frequência mediana calculada através do espectro do perfil pretendido, em Hz.
- DBL** **fm\*** Frequência mediana calculada através do espectro da posição do batedor, em Hz.
- DBL** **fmax** Frequência máxima que o sinal poderá exibir, frequência de Nyquist.
- DBL** **fmax\*** Frequência máxima que o registo da posição do batedor poderá exibir, frequência de Nyquist.
- DBL** **fp** Frequência de pico do espectro do perfil pretendido, a frequência que corresponde à máxima ordenada do espectro, em Hz.
- DBL** **fp\*** Frequência de pico do espectro da posição do batedor, a frequência que corresponde à máxima ordenada do espectro, em Hz.
- DBL** **HS** Altura significativa calculada do espectro do perfil pretendido através da fórmula  $4 \cdot \sqrt{m_0}$ , em metros.
- DBL** **HS\*** Altura significativa calculada do espectro da posição do batedor através da fórmula  $4 \cdot \sqrt{m_0}$ , em metros.
- U16** **Janela Temporal** Filtro utilizado para análise espectral dos sinais temporais.
- U16** **Método** Selecção do método de simulação de um dado perfil na água. Presentemente, apenas o método da Integração da Velocidade Horizontal está disponível. No entanto, está previsto incluir, mais tarde, mais dois outros métodos: o Método dos Filtros e o Método da Decomposição de Fourier.
- I32** **N** Nº de pontos do registo.
- I32** **NJ** Nº de pontos da semi-janela de Bartlett (triangular) considerada no alisamento do espectro obtido. O espectro alisado é calculado através de uma média móvel de  $2 \cdot NJ + 1$  pontos, ponderada triangularmente, e centrada no ponto de cálculo.
- TF** **Para ficheiro (ELE)?** Selector que possibilita guardar os valores do comando

do batedor num ficheiro geralmente de extensão ELE.

-  **Perfil** Representação gráfica temporal do perfil pretendido no canal ou tanque,  $y(t)$ , e correspondente sinal no batedor modificado de acordo com o método e a distância considerados,  $x(t)$ .
-  **Smax** Máxima ordenada do espectro do perfil pretendido, em  $m^2/Hz$ .
-  **Smax\*** Máxima ordenada do espectro da posição do batedor, em  $m^2/Hz$ .
-  **Tp** Período do pico do espectro do perfil pretendido, em segundos.
-  **Tp\*** Período do pico do espectro da posição do batedor, em segundos.
-  **TR** Duração total do registo, em segundos.
-  **TZ** Período médio de zero ascendente calculado através do espectro do perfil pretendido, em segundos.
-  **TZ\*** Período médio de zero ascendente calculado através do espectro da posição do batedor, em segundos.
-  **x0** Distância do batedor de ondas ao ponto onde se pretende obter o dado perfil da superfície da água, em metros.  
No caso de  $x0=0$ , impossível na prática, o Cálculo é mais rápido. Se  $x0>0$ , tem que se calcular adequadas modificações nas fases de cada harmónica.
-  **y(t)** Nome do ficheiro que contém o registo com o perfil pretendido (simulado ou proveniente de um registo real da superfície do mar), geralmente com extensão RGT ou SIM.

## CÓDIGO LABVIEW



---

**LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)**

Espectro Alisado.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Espectro Alisado.vi



Ficheiro Comando.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ficheiro Comando.vi



Integração Velocidade Horizontal.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Integração Velocidade Horizontal.vi



Ler Folha Cálculo.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ler Folha Cálculo.vi



Parâmetros Espectrais.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Parâmetros Espectrais.vi

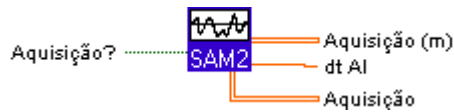


Sinal no batedor.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Sinal no batedor.vi

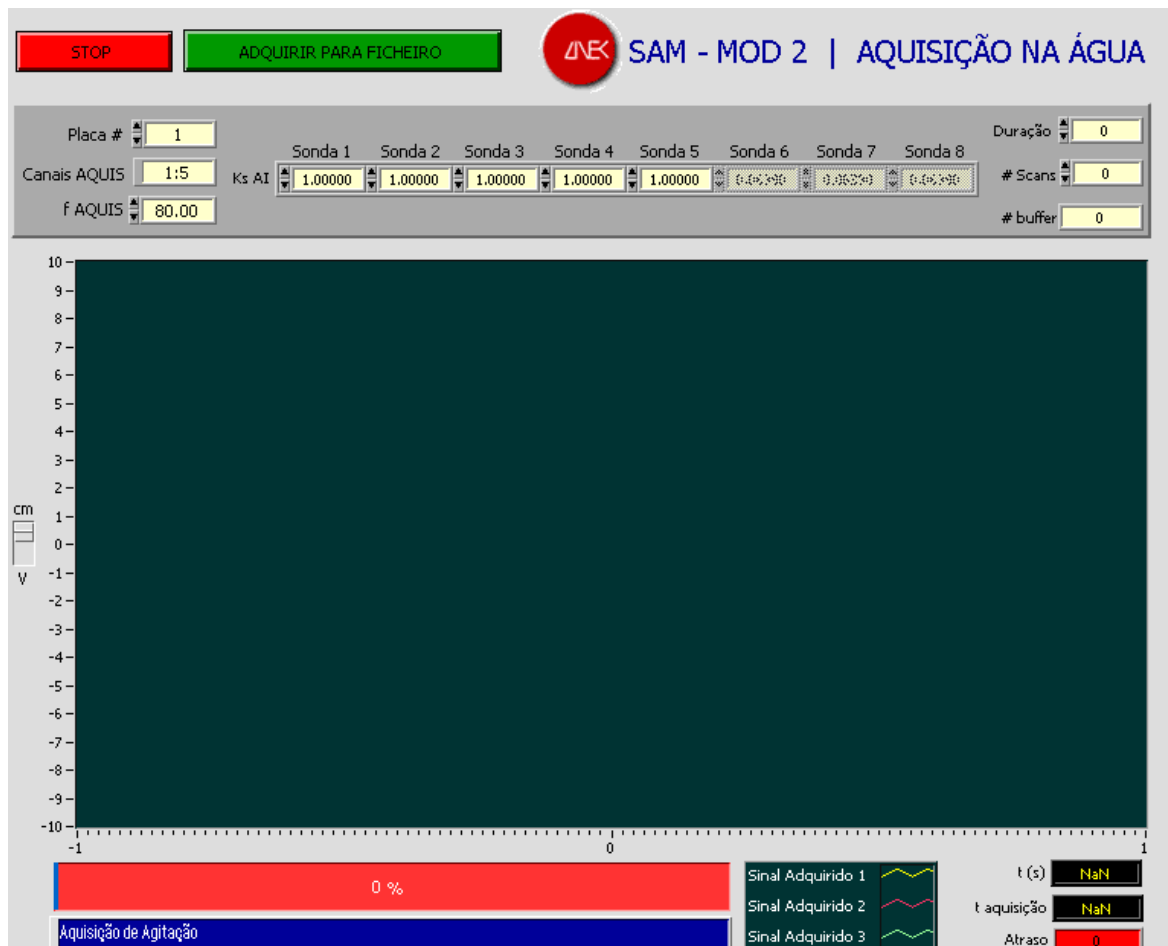


## SAM MOD 2 (AQUISIÇÃO NA ÁGUA).VI

Módulo de Aquisição na água simples, em 8 sondas no máximo.



### PAINEL PRINCIPAL



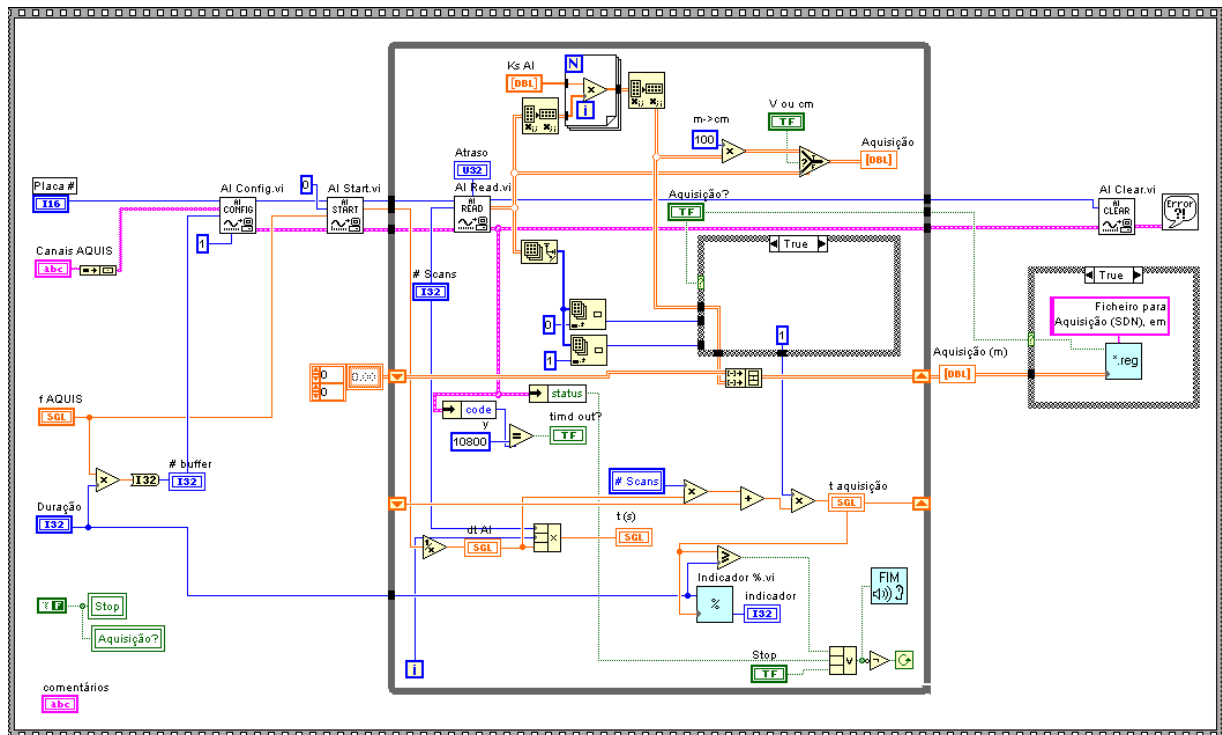
### CONTROLOS E INDICADORES

**132** # buffer Tamanho do "buffer", isto é, o número de pontos de aquisição reti-









dos em memória. Por omissão, este toma o valor de 1,000. Este permite guardar valores a uma elevada frequência de aquisição, enquanto tarefas demoradas (tais como escrever indicadores e, principalmente, desenhar gráficos) são executadas.

- I32** # **Scans** Número de pontos de aquisição retirados do "buffer" de aquisição.
- TF** **Adquirir para ficheiro** Botão que, quando premido, possibilita guardar os valores adquiridos nas diversas sondas (até 8 no total) num ficheiro, geralmente de extensão SDN.
- Fr** **Aquisição** Gráfico com a aquisição nas sondas pretendidas. O eixo das ordenadas pode ser escalado em V ou cm. Trata-se somente de uma transformação na visualização, uma vez que os valores adquiridos para ficheiro estão em metro (m).
- U32** **Atraso** Atraso da leitura dos dados (no visor) em relação à aquisição, ou seja, a quantidade de valores adquiridos menos a quantidade de valores lidos (desenhados). Se o valor aumentar à medida que se lê os dados, isso significa que essa leitura não está a ser suficientemente rápida para a frequência de aquisição pretendida. Nesse caso, há que reduzir a frequência de aquisição ou aumentar o tamanho do "buffer" de aquisição.
- abc** **Canais AQUIS** "String" de identificação do canal ou canais de entrada, de aquisição (para a placa actual, 8 no máximo). Por exemplo, para indicar os canais (sondas) 1, 2, 3, 4 e 5, escrever 1:5. Para indicar somente os canais 2 e 4, escrever 2, 4.
- OBS: Em testes (ciclo fechado), costuma ser 7. Para o macaco hidráulico, 2.
- I32** **Duração** Duração pretendida para a aquisição.
- SGL** **f AQUIS** Frequência de aquisição das elevações em todas as sondas, isto é, o no. de pontos adquiridos por segundo.
- I32** **Indicador** Indicador da parte concluída da aquisição.
- DBL** **Ks AI** Constante do registo que pode ser, se este vier do canal, a característica da sonda, obtida no processo de calibração da sonda, através do cálculo da relação entre o valor da resistência à passagem de água num determinado troço da sonda (em centivolts) e o comprimento daquele (em cm). Aqui, esta constante (que, na verdade, varia de dia para dia!) deverá ser expressa em m/V.
- OBS: Neste painel estão previstas o máximo de 8 sondas.
- I16** **Placa #** Identificação numérica da placa de aquisição. Se só existir uma placa, esta toma o valor 1.
- TF** **Stop** Botão de paragem do módulo. Para regressar ao módulo anterior, premir o botão acima de "Return to Caller".
- SGL** **t (s)** Instante do tempo actual.
- SGL** **t aquisição** Período de tempo de aquisição.
- TF** **V ou cm** Botão que permite visualizar as unidades da aquisição em metro ou em Volt. Notar que esta mudança de unidade ocorre apenas no gráfico, pelo que há sempre que verificar se a constante Ks AI está correcta, uma vez que esta se reflectirá sempre no ficheiro de aquisição.

## CÓDIGO LABVIEW



## LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)

|   |  |
|---|--|
|  | AI Clear.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\daq\AI.LLB\AI Clear.vi                                  |
|  | AI Config.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\daq\AI.LLB\AI Config.vi                                |
|  | AI Read.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\daq\AI.LLB\AI Read.vi                                    |
|  | AI Start.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\daq\AI.LLB\AI Start.vi                                  |
|  | Ficheiro Registo Aquisição 2D.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ficheiro Registo Aquisição 2D.vi |
|  | Indicador %.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Indicador %.vi                                     |
|  | Simple Error Handler.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\Utility\error.lib\Simple Error Handler.vi   |
|  | Sinal de acabar.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Sinal de acabar.vi                             |





## SAM MOD 3 (GERAÇÃO E AQUISIÇÃO).VI

Este VI permite simultaneamente gerar e adquirir dados utilizando uma placa (#1). Para executar este VI é necessário possuir uma placa de modo a utilizar as rotinas de output de baixo nível AO Config, AO Write, AO Start, e AO Clear.

Cada sinusóide é calculada através de uma função TRIG num ciclo FOR. O Canal de saída (output) e o "buffer" são inicializados através da rotina AO Config, depois as sinusóides são armazenadas no "buffer" através do uso do AO Write e finalmente a geração é iniciada com a frequência de actualização pretendida através da execução da rotina AO Start.

Se não existir erro, há uma espera do ciclo WHILE até que o botão STOP possa ser premido. Esta espera é necessária para preservar tempo suficiente para processar dados do "buffer", deixando assim memória de CPU para outras aplicações multitarefa.

Quando o botão STOP é premido, acaba a geração com AO Clear, liberta-se o "buffer" e o canal de output é enchido de zeros.

[ Adaptado, com muitas modificações, da "DAQ\Generate Continuous Sine wave.vi" LabVIEW library por Rui Capitão, LNEC/DH/NPP ]



## PAINEL PRINCIPAL



## CONTROLOS E INDICADORES

- I32 **# Scans** Número de pontos de aquisição retirados do "buffer" de aquisição.
- E34 **Aquisição** Gráfico com a aquisição nas sondas pretendidas. O eixo das ordenadas pode ser escalado em V ou cm. Trata-se apenas de uma transformação de visualização, uma vez que os valores adquiridos para ficheiro estão em metro (m).
- TF **Aquisição para ficheiro (SDN)** Selector que possibilita guardar os valores adquiridos nas diversas sondas (até 8 no total) num ficheiro, geralmente de extensão SDN.
- U32 **Atraso** Atraso da leitura dos dados (no visor) em relação à aquisição, ou seja, a quantidade de valores adquiridos menos a quantidade de valores lidos (desenhados). Se o valor aumentar à medida que se lê os dados, isso significa que essa leitura não está a ser suficientemente rápida para a frequência de aquisição pretendida. Nesse caso, há que reduzir a frequência de aquisição ou aumentar o tamanho do "buffer" de aquisição.
- abc **Canais AQUIS** "String" de identificação do canal ou canais de entrada, de aquisição (para a placa actual, 8 no máximo). Por exemplo, para indicar os

canais (sondas) 1, 2, 3, 4 e 5, escrever 1:5. Para indicar somente os canais 2 e 4, escrever 2, 4.

OBS: Em testes (ciclo fechado), costuma ser 7. Para o macaco hidráulico, 2.

**abc** **Canais GER** "String" com a identificação do canal ou canais de saída (para a placa actual, 2 no máximo). Pode, por exemplo, tomar a designação { 0,1 } para identificar os canais 0 e 1.

**I32** **Duração** Duração da aquisição = duração do sinal gerado.

**SGL** **f AQUIS** Frequência de aquisição das elevações na sonda, isto é, o no. de pontos adquiridos por segundo.

**DBL** **f GER** Frequência de actualização do ficheiro de comando do batedor, isto é, o no. de ordens dadas ao batedor por segundo.

**TF** **Ficheiro com o sinal de Comando (ELE)?** Selector que possibilita guardar os valores do ficheiro de comando do batedor, geralmente de extensão ELE.

**DBL** **Ganho** Botão de ganho do gerador. Este botão evita o recurso ao botão de ganho geralmente existente à entrada da servo-válvula do batedor. Assim, 0% de ganho corresponde à imobilização do batedor, ao passo que 100% de ganho corresponde a movimentos do batedor proporcionais às elevações do sinal a gerar, sendo que o curso máximo do batedor é atingido na elevação máxima contida no sinal.

**abc** **Geração** Gráfico do sinal a gerar na água, afectado pelo ganho do gerador.

**TF** **Gerar** Botão que inicia a geração do sinal na água.

**I32** **Indicador** Indicador da parte concluída da geração/aquisição.

**DBL** **Ks AI** Constante do registo que pode ser, se este vier do canal, a característica da sonda, obtida no processo de calibração da sonda, através do cálculo da relação entre o valor da resistência à passagem de água num determinado troço da sonda (em centivolts) e o comprimento daquele (em cm). Aqui, esta constante (que, na verdade, varia de dia para dia!) deverá ser expressa em m/V.

OBS: Neste painel estão previstas apenas 6 sondas de aquisição (S1, S2 e S3). Se houver mais, até ao máximo de 8, alargar os campos com o rato, se necessário.

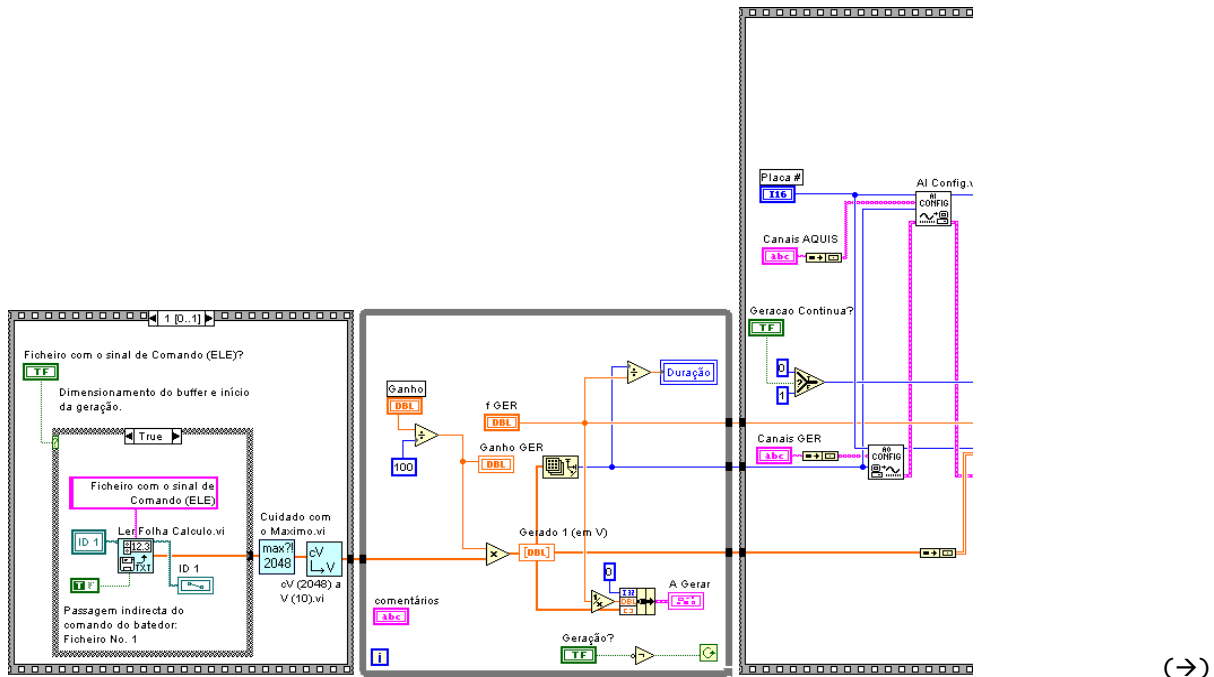
**I16** **Placa #** Identificação numérica da placa de aquisição. Se só existir uma placa, esta toma o valor 1.

**TF** **Stop** Botão de paragem do módulo. Para regressar ao módulo anterior, premir o botão acima de "Return to Caller".

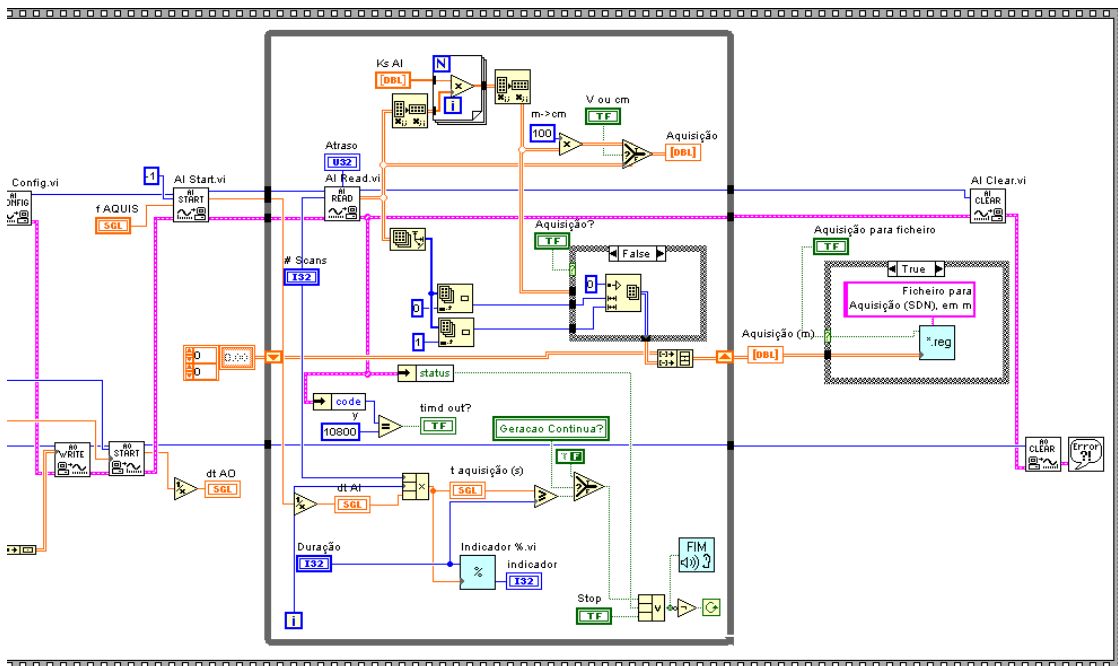
**SGL** **t aquisição (s)** Período de tempo de aquisição.

**TF** **V ou cm** Botão que permite visualizar as unidades da aquisição em metro ou em Volt. Notar que esta mudança de unidade ocorre apenas no gráfico, pelo que há sempre que verificar se a constante Ks AI está correcta, uma vez que esta se reflectirá sempre no ficheiro de aquisição.

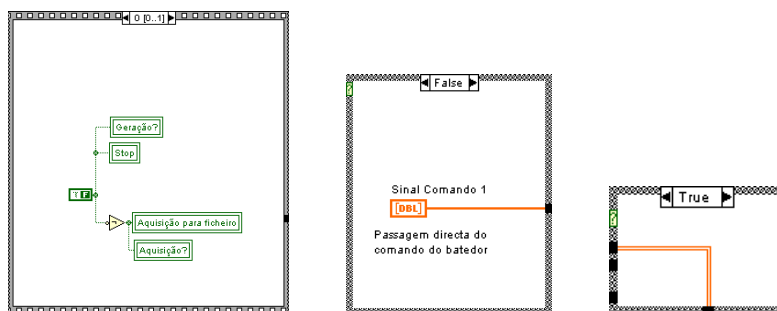
# CÓDIGO LABVIEW

















(→)



(←)

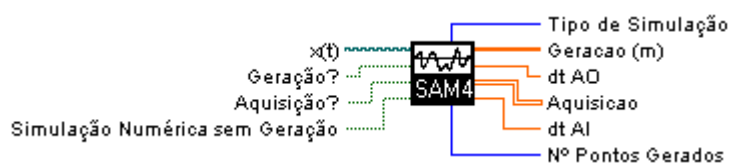


## LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)

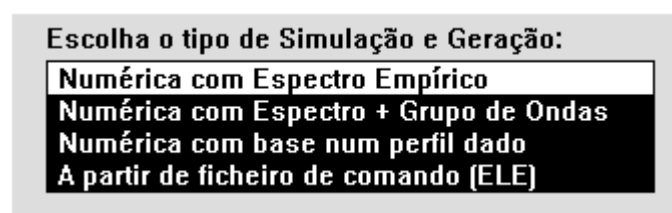
|   |  |
|---|--|
|    | AI Clear.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\daq\AI.LLB\AI Clear.vi                                  |
|    | AI Config.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\daq\AI.LLB\AI Config.vi                                |
|    | AI Read.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\daq\AI.LLB\AI Read.vi                                    |
|    | AI Start.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\daq\AI.LLB\AI Start.vi                                  |
|    | AO Clear.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\DAQ\AO.LLB\AO Clear.vi                                  |
|    | AO Config.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\DAQ\AO.LLB\AO Config.vi                                |
|    | AO Start.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\DAQ\AO.LLB\AO Start.vi                                  |
|   | AO Write.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\DAQ\AO.LLB\AO Write.vi                                  |
|  | Cuidado com o Máximo.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Cuidado com o Máximo.vi                   |
|  | cV (2048) a V (10).vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\cV (2048) a V (10).vi                       |
|  | Ficheiro Registo Aquisição 2D.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ficheiro Registo Aquisição 2D.vi |
|  | Indicador %.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Indicador %.vi                                     |
|  | Ler Folha Cálculo.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ler Folha Cálculo.vi                         |
|  | Simple Error Handler.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\Utility\error.llb\Simple Error Handler.vi   |
|  | Sinal de acabar.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Sinal de acabar.vi                             |



## SAM MOD 4 (SIMULAÇÃO, GERAÇÃO E AQUISIÇÃO).VI



### PAINEL PRINCIPAL

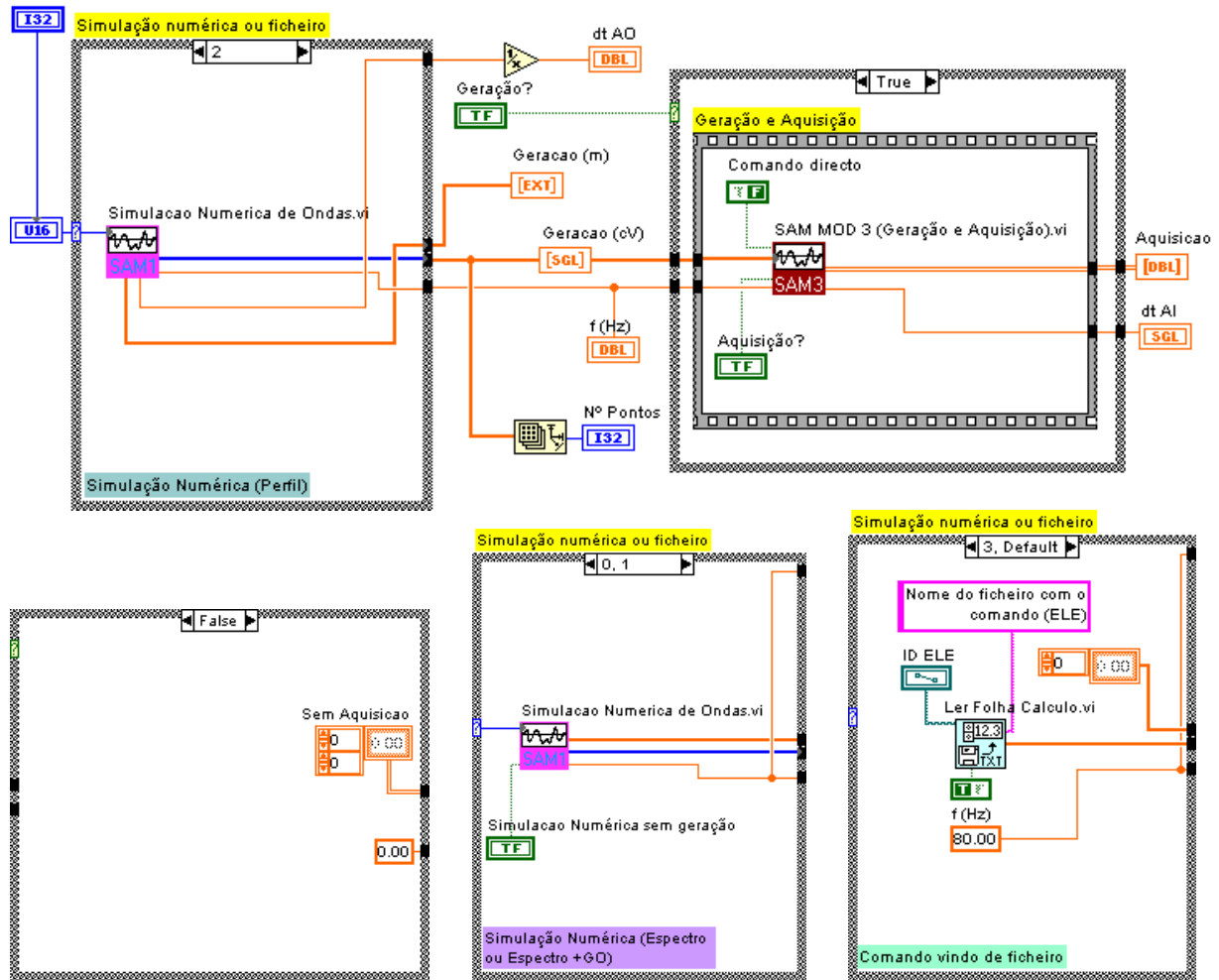


### CONTROLOS E INDICADORES

- 132** Escolha o tipo de Simulação e Geração: Escolha do método segundo o qual se vai produzir agitação na água. Os métodos existentes são:
- 1- Espectro - Método da Fase Aleatória
  - 2- Espectro + Grupos de Ondas - Método da Escalagem
  - 3- Perfil Dado - Método da integração da velocidade horizontal
  - 4- A partir de um ficheiro de comando do batedor (ELE)

## CÓDIGO LABVIEW

Escolha o tipo de Simulação e Geração:



## LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)



Ler Folha Cálculo.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ler Folha Cálculo.vi



SAM MOD 3 (Geração e Aquisição).vi  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 3 (Geração e Aquisição).vi



Simulação Numérica de Ondas.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Simulacao Numérica de Ondas.vi



## SAM MOD 5 (CALIBRAÇÃO DE SONDAS).VI

Painel de calibração de sondas, com possibilidade de aquisição simples (sem geração). Atenção que os indicadores digitais de aquisição, no visor, têm as unidades de cV. Para transformar aqueles em metro, deve dividir-se por 100 e multiplicar-se pela constante correspondente à sonda, KSi. Contudo, quer no gráfico, quer no ficheiro, a unidade é o V, pelo que nestes casos se deve apenas multiplicar por KSi para obter m.

### PAINEL PRINCIPAL

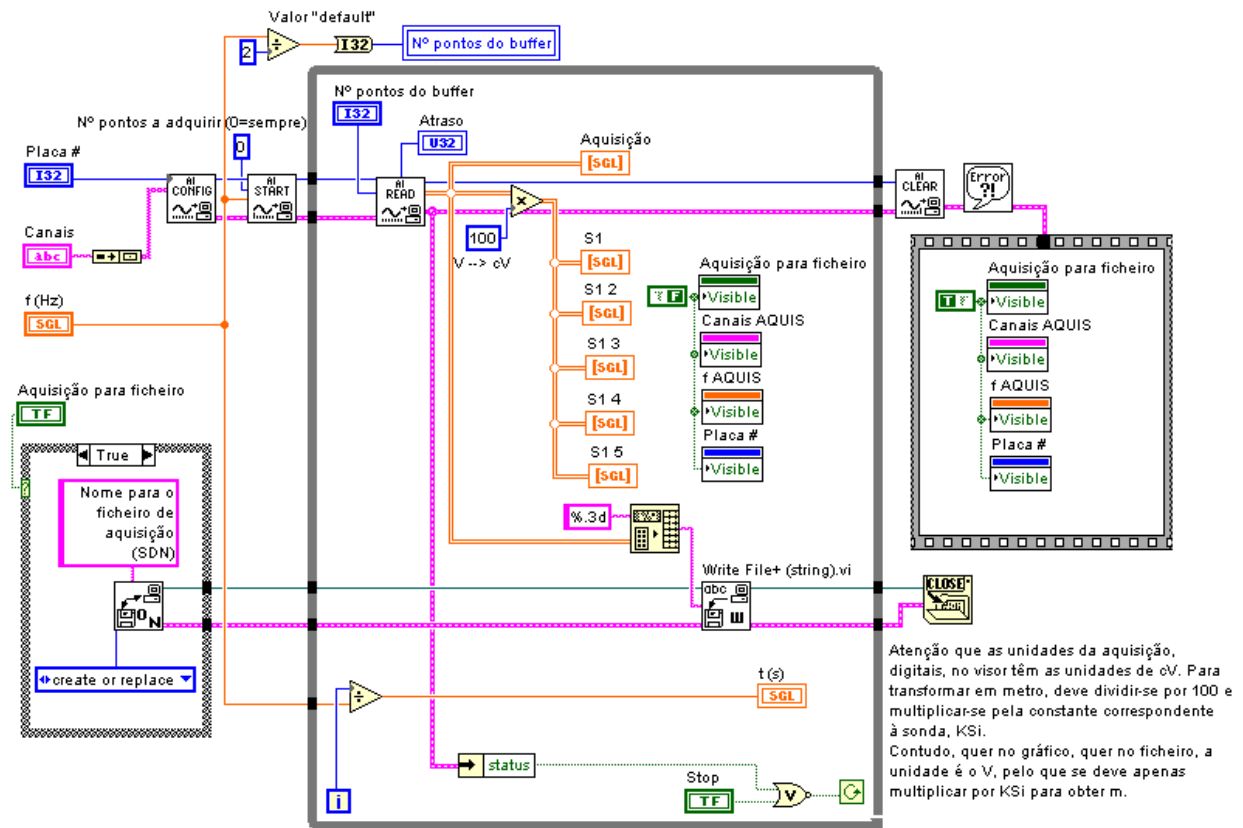




## CONTROLOS E INDICADORES

- TF** **Aquisição (em V) para ficheiro (SDN)** Selector que possibilita guardar os valores do ficheiro de aquisição, geralmente de extensão SDN.
- [SGL]** **Aquisição** Gráfico dos valores adquiridos nas diversas sondas identificadas em "Canais AQUIS", em Volts.
- [U32]** **Atraso** Atraso (scan backlog) entre o que é lido e o que é adquirido (nº pontos lidos - nº pontos adquiridos). Este indicador deve estar sempre a zero. No caso de não estar, ou de aumentar sucessivamente, significa que a leitura se faz mais lentamente do que a aquisição, pelo que vai dar erro quando este atraso ultrapassar o tamanho máximo do "buffer". Para evitar este erro, pode ou diminuir-se a frequência de aquisição, ou aumentar-se o tamanho do "buffer" (nº de pontos do "buffer").
- [abc]** **Canais "String"** de identificação do canal ou canais de entrada, de aquisição (para a placa actual, 8 no máximo). Por exemplo, para indicar os canais (sondas) 1, 2, 3, 4 e 5, escrever 1:5. Para indicar somente os canais 2 e 4, escrever 2, 4.
- OBS: Se for necessário utilizar mais do que 5 sondas, arrastar com o rato.
- [SGL]** **f (Hz)** Frequência de aquisição das elevações na sonda, isto é, o no. de pontos adquiridos por segundo.
- [I32]** **Nº pontos do buffer** Nº de pontos armazenados no "buffer". Este permite guardar valores a uma elevada frequência de aquisição, enquanto tarefas demoradas (tais como escrever indicadores e, principalmente, desenhar gráficos) são executadas.
- [I32]** **Placa #** Nº identificativo da placa de aquisição, por omissão=1.
- [SGL]** **S1** Valor digital da 1ª Sonda, em cV.
- [SGL]** **S2** Valor digital da 2ª Sonda, em cV.
- [SGL]** **S3** Valor digital da 3ª Sonda, em cV.
- [SGL]** **S4** Valor digital da 4ª Sonda, em cV.
- [SGL]** **S5** Valor digital da 5ª Sonda, em cV.
- TF** **Stop** Botão de paragem do módulo.
- [SGL]** **t (s)** Indicador do tempo decorrido.

## CÓDIGO LABVIEW



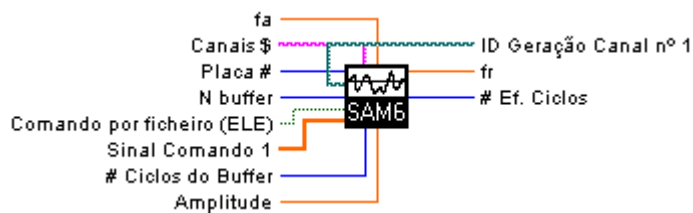
## LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)

- 
AI Clear.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\daq\AI.LLB\AI Clear.vi
- 
AI Config.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\daq\AI.LLB\AI Config.vi
- 
AI Read.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\daq\AI.LLB\AI Read.vi
- 
AI Start.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\daq\AI.LLB\AI Start.vi
- 
Open/Create/Replace File.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\Utility\file.11b\Open/Create/Replace File.vi
- 
Simple Error Handler.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\Utility\error.11b\Simple Error Handler.vi
- 
Write File+ (string).vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\Utility\file.11b\Write File+ (string).vi



## SAM MOD 6 (CONTROLO DO BATEDOR).VI

Módulo de Geração e controlo do batedor. Este módulo permite gerar agitação em dois canais (o máximo que a placa permite), simultaneamente, através da leitura de correspondentes ficheiros de comando (ELE).



### PAINEL PRINCIPAL

OFF

SAM - MOD 6 | CONTROLO DO BATEDOR

Placa #

N

# Ciclos do Buffer

fr

Canais \$

fa

Amplitude

# Ef. Ciclos

Comando por ficheiro (ELE)

ID Geração Canal nº 1

ID Geração Canal nº 2

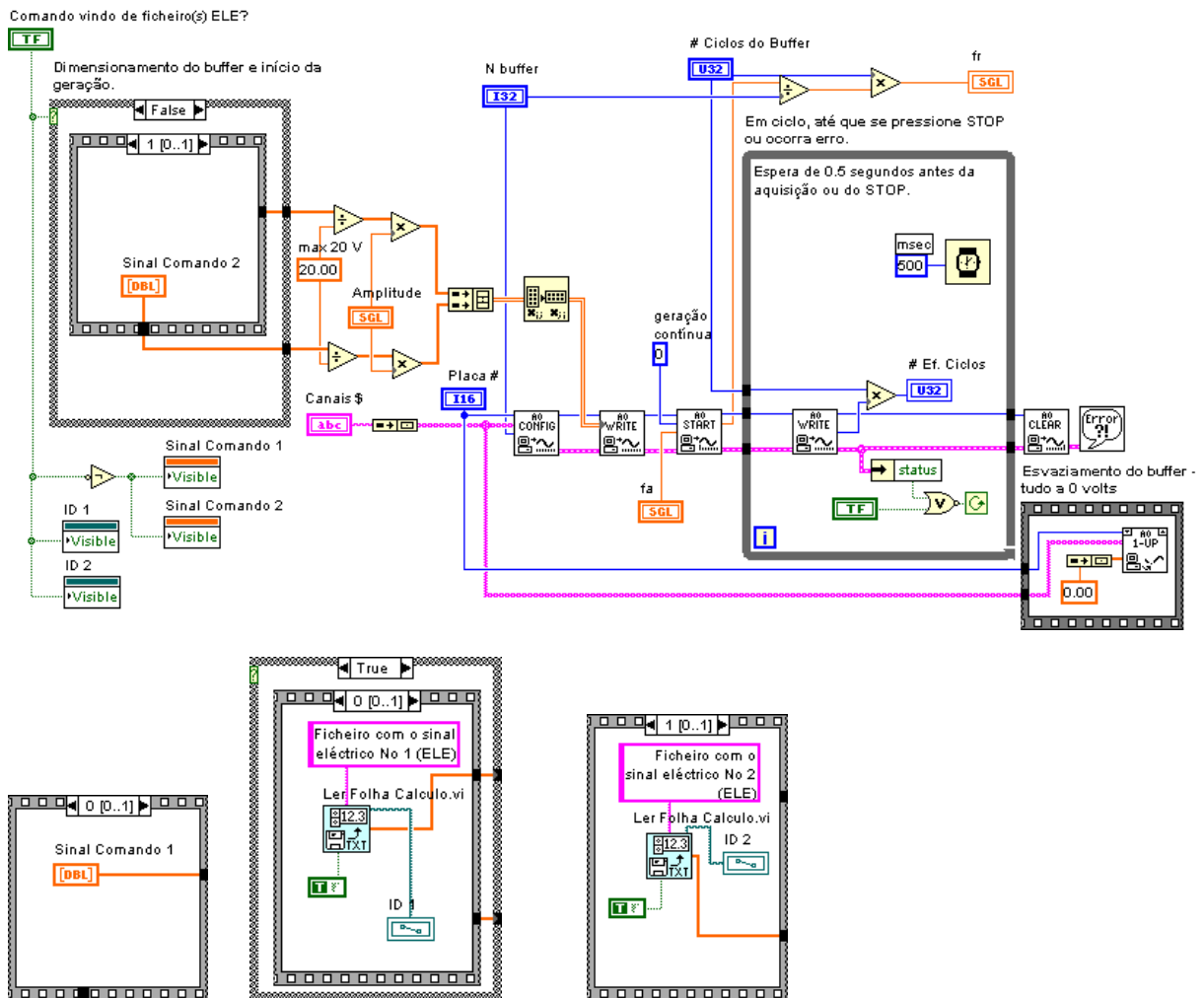
### CONTROLOS E INDICADORES

- U32 **# Ciclos do Buffer** Número de vezes que o "buffer" é esvaziado.
- U32 **# Ef. Ciclos** Número de ciclos gerados no "buffer" e transferidos da placa de aquisição.
- SGL **Amplitude** Amplitude do pico do sinal pretendido, em Volts.
- abc **Canais \$** "String" com a identificação do canal ou canais de saída. Pode, por exemplo, tomar a designação { 0,1 } para identificar os canais 0 e 1.
- TF **Comando por ficheiro (ELE)?** Selector que possibilita guardar os valores do

ficheiro de comando do batedor, geralmente de extensão ELE.

- SGL** **fa** Frequência de actualização (geração) do ficheiro de comando do batedor, isto é, o no. de ordens dadas ao batedor por segundo.
- SGL** **fr** Frequência real, em Hz.
- ID 1** Nome do ficheiro que contém o registo simulado ou do canal para um primeiro canal de geração - deixar o outro em branco se só pretender gerar num canal.
- ID 2** Nome do ficheiro que contém o registo simulado ou do canal para o 2º canal de geração.
- I32** **N** Número de pontos do ficheiro de comando, que determina, assim, o tamanho do "buffer". O "buffer" pode ser enchido várias vezes, consoante o número de ciclos pretendido, permitindo assim a geração repetida do que está no "buffer".
- I16** **Placa #** Identificação numérica da placa de aquisição. Se só existir uma placa, esta toma o valor 1.

## CÓDIGO LABVIEW



---

**LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)**

A0 Clear.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\DAQ\A0.LLB\A0 Clear.vi



A0 Config.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\DAQ\A0.LLB\A0 Config.vi



A0 Start.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\DAQ\A0.LLB\A0 Start.vi



A0 Write One Update.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\DAQ\A0.LLB\A0 Write One Update.vi



A0 Write.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\DAQ\A0.LLB\A0 Write.vi



Ler Folha Cálculo.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ler Folha Cálculo.vi

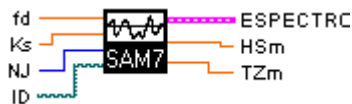


Simple Error Handler.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\Utility\error.lib\Simple Error Handler.vi

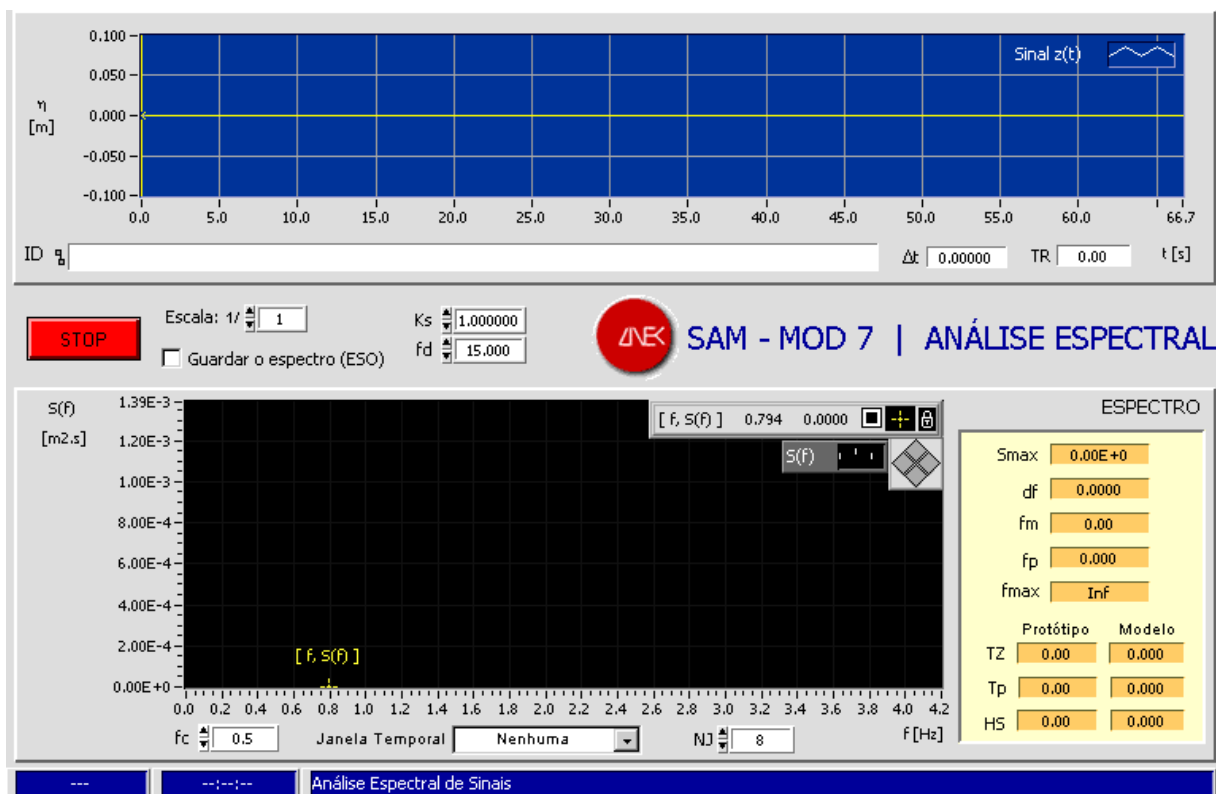


## SAM MOD 7 (ANÁLISE ESPECTRAL).VI

Módulo de Análise Espectral de Sinais.



### PAINEL PRINCIPAL



### CONTROLOS E INDICADORES

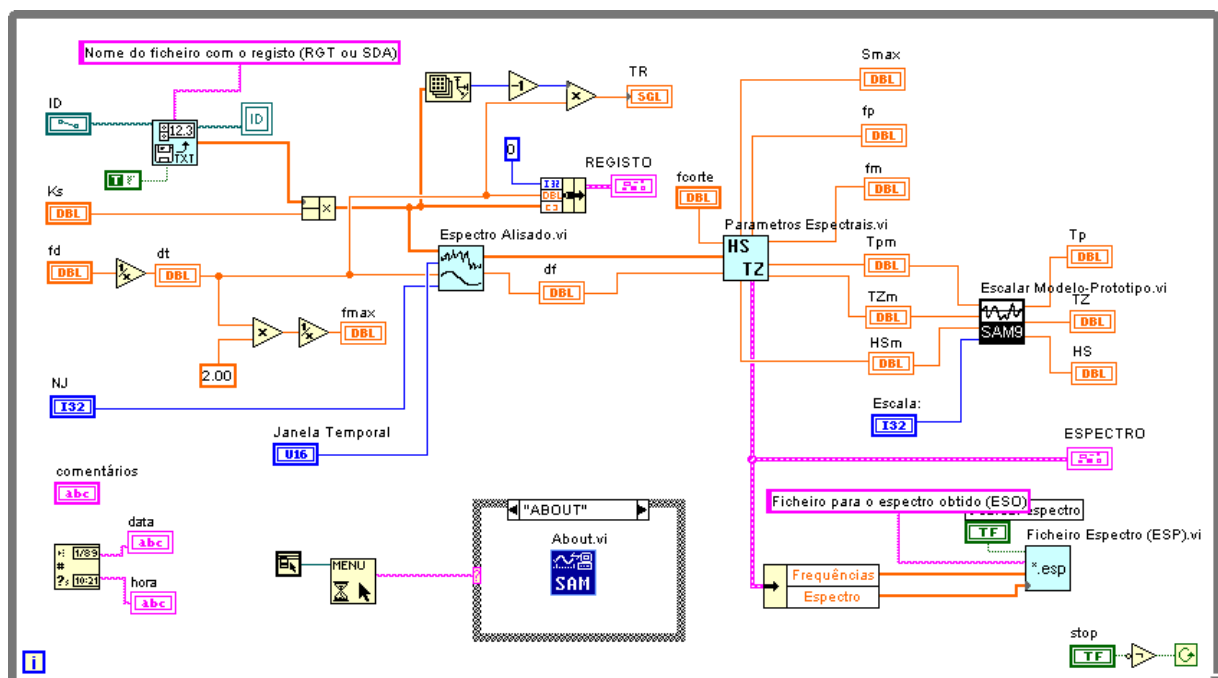
**DBL** **df** Intervalo entre frequências do espectro, em Hz. Utilizam-se  $N/2$  frequências harmônicas para que a frequência correspondente a  $N/2$  não ultrapasse a Frequência de Nyquist.

**DBL** **dt** Intervalo de tempo entre observações, em s.





- I32** **Escala:** Escala geométrica do modelo. Utilização da lei de semelhança de Froude. Por omissão, esta toma o valor 1:1 (escala do protótipo).
- FFT** **Espectro** Representação gráfica do espectro obtido após utilização da Transformada Rápida de Fourier (FFT) do sinal. Se se quiser, as ordenadas deste espectro podem ser guardadas num ficheiro .ESO - seleccionar acima.
- OBS: Este gráfico permite a deslocação de um cursor (a amarelo), com indicação das suas coordenadas [f, S(f)] no topo do gráfico.
- DBL** **fc** Frequência de corte ou máxima na representação gráfica dos espectros, em Hertz ou ciclos/segundo. Em sinais da natureza, é costume considerar-se  $fc=0.5$  Hz, ao passo que à escala do canal (1/50) é costume usar-se  $fc=2$  Hz. Por outro lado,  $fc \leq f_{max}$ .
- DBL** **fd** Frequência de digitalização, inverso do intervalo entre observações ( $= 1/dt$ ), em Hertz ou ciclos/segundo. Deve satisfazer-se a seguinte condição:  $fd > 2 \cdot f_{max}$ , sendo  $f_{max}$  a frequência máxima presente no sinal. Em sinais da natureza, é costume considerar-se  $f_{max}=0.5$  Hz, ao passo que à escala do canal (1/50) é típico usar-se  $f_{max}=2$  Hz.
- DBL** **fm** Frequência mediana calculada através do espectro obtido, em Hz.
- DBL** **fmax** Frequência máxima que o sinal poderá exibir, frequência de Nyquist.
- DBL** **fp** Frequência de pico do espectro obtido, a frequência que corresponde à máxima ordenada do espectro, em Hz.
- TF** **Guardar o espectro (ESO)?** Selector que possibilita guardar as ordenadas do espectro obtido num ficheiro, geralmente de extensão ESO.
- DBL** **HSm** Altura significativa calculada do espectro obtido à escala do modelo, em metros.
- DBL** **HSp** Altura significativa calculada do espectro obtido, à escala do protótipo, através da fórmula  $4 \cdot \sqrt{m0}$ , em metros.
- D=mg** **ID** Identificação do ficheiro que contém o registo. No caso de este campo se encontrar vazio (o que acontece sempre que se inicia o programa), será perguntado o nome do ficheiro. Se a seguir se correr o programa em modo contínuo, não será necessário introduzir mais vezes este campo, a não ser evidentemente que se pretenda mudar de ficheiro.
- U16** **Janela Temporal** Filtro utilizado para análise espectral dos sinais temporais.
- DBL** **Ks** Constante do registo que pode ser, se este vier do canal, a característica da sonda, obtida no processo de calibração da sonda, através do cálculo da relação entre o valor da resistência à passagem de água num determinado troço da sonda (em centivolts) e o comprimento daquele (em cm). Aqui, esta constante (que, na verdade, varia de dia para dia!) deverá ser expressa em m/V.
- I32** **NJ** Nº de pontos da semi-janela de Bartlett (triangular) considerada no alisamento do espectro obtido. O espectro alisado é calculado através de uma média móvel de  $2 \cdot NJ + 1$  pontos, ponderada triangularmente, e centrada no ponto de cálculo.
- FFT** **Registo** Representação gráfica da elevação da superfície da água.
- DBL** **Smax** Máxima ordenada do espectro obtido, em  $m^2/Hz$ .

- DBL** **T<sub>pm</sub>** Período de pico do espectro obtido à escala do modelo, em segundos (inverso da frequência de pico, fp).
- DBL** **T<sub>pp</sub>** Período de pico do espectro obtido à escala do protótipo, em segundos (inverso da frequência de pico, fp).
- SGL** **TR** Duração total do registo analisado, em segundos.
- DBL** **TZ<sub>m</sub>** Período médio de zero ascendente calculado através do espectro obtido à escala do modelo, em segundos.
- DBL** **TZ<sub>p</sub>** Período médio de zero ascendente calculado através do espectro obtido à escala do protótipo, em segundos.

## CÓDIGO LABVIEW



## LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)

-  Escalar Modelo-Protótipo.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Escalar Modelo-Protótipo.vi
-  Espectro Alisado.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Espectro Alisado.vi
-  Ficheiro Espectro (ESP).vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ficheiro Espectro (ESP).vi
-  Info.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Info.vi





Ler Folha Cálculo.vi

C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ler Folha Cálculo.vi

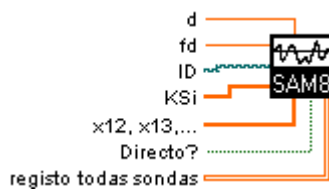


Parâmetros Espectrais.vi

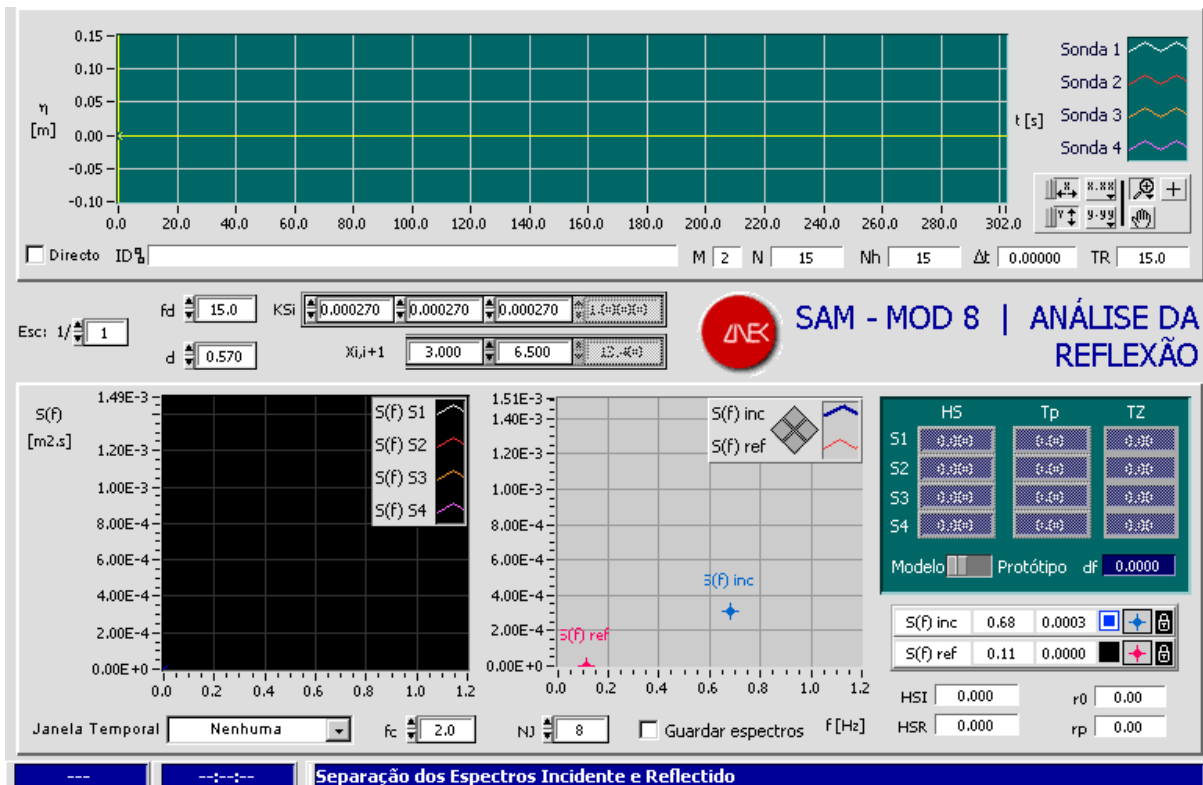
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Parâmetros Espectrais.vi

## SAM MOD 8 (ANÁLISE DA REFLEXÃO).VI

Módulo de Separação de Espectros Incidente e Reflectido, dados 2 ou mais registos de sondas no canal de ondas irregulares. Consoante o nº de sondas é igual ou superior a 2, assim se utiliza o método das 2 sondas de Goda e Suzuki, ou o método adaptado das M sondas de Funke e Mansard.



### PAINEL PRINCIPAL



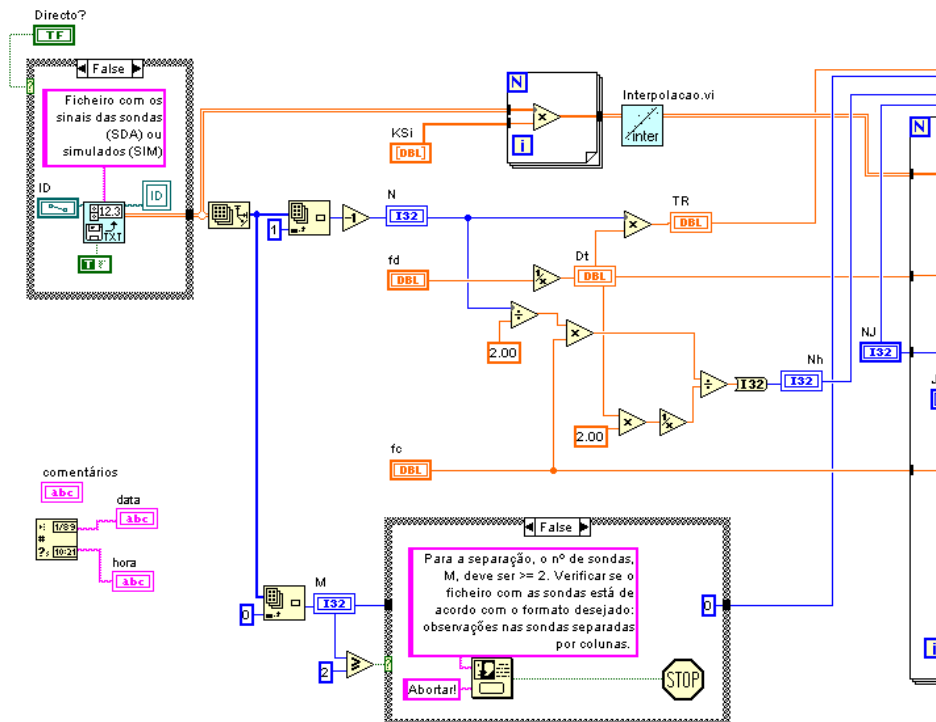
### CONTROLOS E INDICADORES

 **d** Profundidade do canal, em metros.

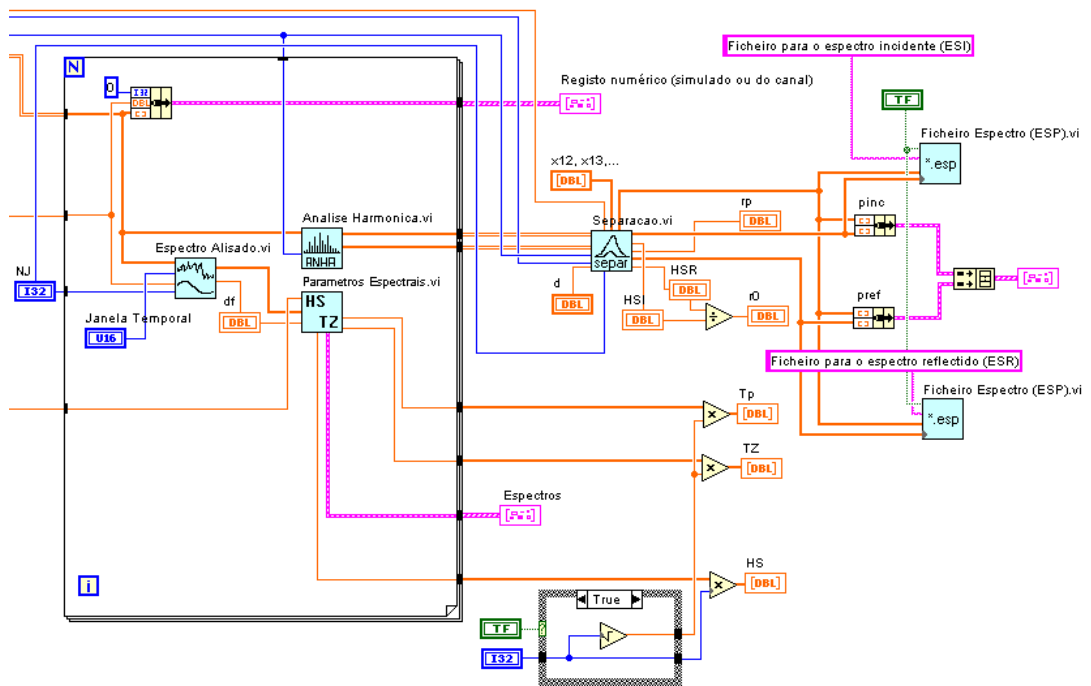
- DBL** **df** Intervalo entre frequências dos espectros, em Hz. Utilizam-se  $N/2$  frequências harmônicas para que a frequência correspondente a  $N/2$  não ultrapasse a Frequência de Nyquist.
- TF** **Directo?** Directo se o ficheiro com os valores das sondas vem de outro módulo.
- DBL** **dt** Intervalo de tempo entre observações, inverso de  $fd$ .
- I32** **Escala:** Escala gráfica, quando necessária. Por omissão, usa-se 1/1. HS, TZ e Tp são afectados pela escala.
- FW** **Espectros dos sinais (gráfico da esquerda, em baixo)** Representação gráfica dos espectros nas diversas sondas consideradas após utilização da Transformada Rápida de Fourier (FFT) dos sinais.
- FW** **Espectros incidente e reflectido (gráfico da direita, em baixo)** Representação gráfica dos espectros incidente e reflectido, obtido através da utilização do método de Mansard e Funke, 1980, com ligeiras adaptações, utilizando também FFT's. As ordenadas destes espectros são guardadas em dois ficheiros, geralmente de extensões .ESI e .ESR, respectivamente.
- DBL** **fc** Frequência máxima considerada no algoritmo de separação dos espectros incidente e reflectido. Em sinais da natureza, é costume considerar-se  $fc=0.5$  Hz, ao passo que à escala do canal (1/50) é costume usar-se  $fc=2$  Hz.
- DBL** **fd** Frequência de digitalização, inverso do intervalo entre observações ( $= 1/dt$ ), em Hertz ou ciclos/segundo. Deve satisfazer-se a seguinte condição:  $fd > 2 \cdot f_{max}$ , sendo  $f_{max}$  a frequência máxima presente no sinal. Em sinais da natureza, é costume considerar-se  $f_{max}=0.5$  Hz, ao passo que à escala do canal (1/50) é costume usar-se  $f_{max}=2$  Hz. Nos canais do LNEC é costume usar-se  $fd=80$  Hz, embora considerado excessivo.
- DBL** **HS** Altura significativa em cada sonda, calculada do espectro e obtida através da fórmula  $4 \cdot \sqrt{m_0}$ , em metros.
- DBL** **HSI** Altura significativa incidente calculada através da energia do espectro incidente ( $m_{0I}$ ), após alisamento com janela de Bartlett.
- DBL** **HSR** Altura significativa reflectida calculada através da energia do espectro reflectido ( $m_{0R}$ ), após alisamento com janela de Bartlett.
- DBL** **ID** Nome do ficheiro que contém o registo simulado ou do canal. O ficheiro deve conter, por coluna, as observações correspondentes às sondas S1, S2, S3, etc., separadas por  $dt=1/fd$ .
- U16** **Janela Temporal** Tipo de janela temporal utilizada para evitar o fenómeno de Gibbs. Por omissão, não se considera janela nenhuma, ou melhor, considera-se a janela rectangular!
- DBL** **KS<sub>i</sub>** Constantes características das diversas sondas, obtidas no processo de calibração através do cálculo da relação entre o valor da resistência à passagem de água num determinado troço da sonda (em centivolts) e o comprimento daquele (em cm). Estas constantes (que, na verdade, variam de dia para dia!) deverão ser expressas em m/V. [ Se houver mais que 4 sondas, alargar o array com o rato ]
- I32** **M** N° de sondas
- I32** **N** N° de pontos registados para cada sonda.
- I32** **Nh** N° de sinusóides utilizadas na análise harmónica dos sinais das sondas..

- I32** NJ N° de pontos da semi-janela de Bartlett (triangular) considerada no alisamento quer dos espectros nas sondas, quer dos espectros incidente e reflectido reconstituídos. O espectro alisado é calculado através de uma média móvel de  $2 \cdot NJ + 1$  pontos, ponderada triangularmente, e centrada no ponto de cálculo.
- DBL** r0 Coeficiente de reflexão global obtido através das energias dos espectros incidente e reflectido ( $mOI$  e  $mOR$ ), após alisamento com janela de Bartlett.
- Fr** Registo numérico Representação gráfica dos sinais colhidos nas diversas sondas.
- DBL** rp Coeficiente de reflexão global calculado a partir dos picos dos espectros incidente e reflectido [ $Si(fp)$  e  $Sr(fp)$ ], após alisamento com janela de Bartlett.
- DBL** Tp Período de pico em cada sonda calculado através do espectro, em segundos.
- DBL** TR Duração total do registo, em segundos.
- DBL** TZ Período médio de zero ascendente em cada sonda calculado através do espectro, em segundos.
- DBL** x12, x13, ... Distâncias (em m) entre as diversas sondas:  
 x12 - entre a sonda 1 e a sonda 2;  
 x13 - entre a sonda 1 e a sonda 3;  
 x14 - entre a sonda 1 e a sonda 4;  
 [ ... ] etc.  
 [ Se houver mais que 4 sondas, alargar o array com o rato ]

## CÓDIGO LABVIEW



(→)



(←)

## LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)



Analise Harmónica.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Analise Harmónica.vi



Espectro Alisado.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Espectro Alisado.vi



Ficheiro Espectro (ESP).vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ficheiro Espectro (ESP).vi



Interpolação.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Interpolação.vi



Ler Folha Cálculo.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ler Folha Cálculo.vi



Parâmetros Espectrais.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Parâmetros Espectrais.vi



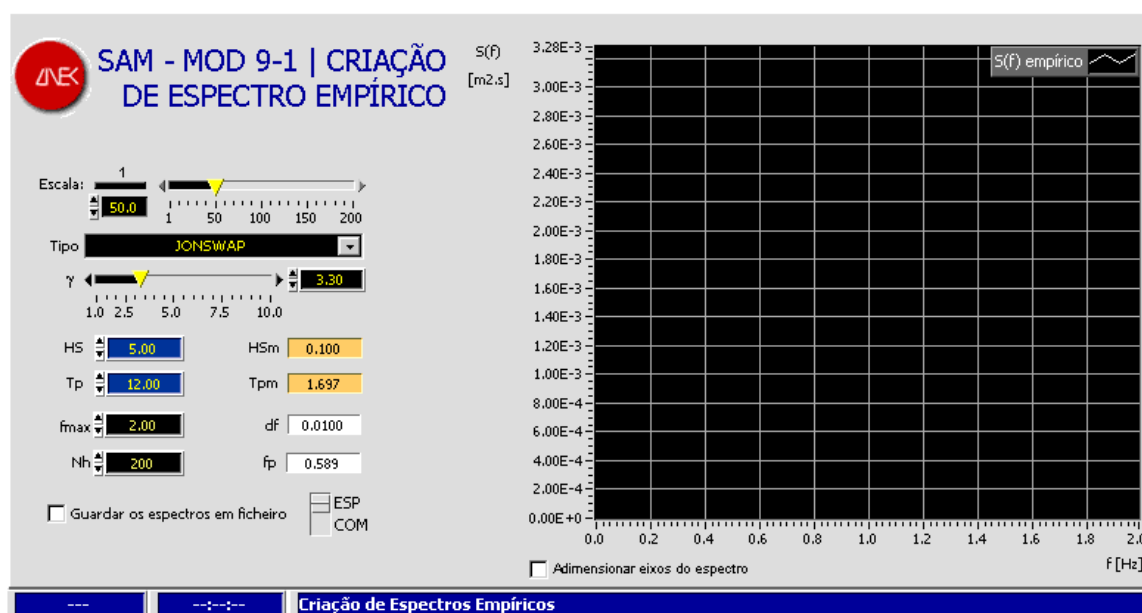
Separação.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Separação.vi



## SAM MOD 9-1 (CRIAÇÃO DE ESPECTRO EMPÍRICO).VI

Módulo de Criação de Espectros Empíricos.

### PAINEL PRINCIPAL



### CONTROLOS E INDICADORES

- TF **Adimensionar eixos do espectro** Permite adimensionar os eixos do espectro.
- abc **comentários** Linha opcional de comentários ou informações sobre a simulação em curso.
- DBL **df** Intervalo entre frequências do espectro empírico, em Hz.
- 132 **Escala:** Escala geométrica do modelo. Utilização da lei de semelhança de Froude.
- TF **ESP/COM** ESP - Frequências e ordenadas do espectro, COM- Frequências apenas;
- DBL **fmax** Frequência máxima do espectro, em Hertz.
- DBL **fp** Frequência de pico do espectro, a frequência que corresponde à máxima or-

denada do espectro empírico, em Hz.

**DBL**  $\gamma$  Parâmetro do espectro JONSWAP-Goda.

**FFT** **Gráfico do Espectro** Representação gráfica do espectro empírico, com as características introduzidas pelo utilizador. O espectro empírico é guardado num ficheiro .ESP (frequências e ordenadas) ou .COM (só ordenadas).

**TF** **Guardar os espectros em ficheiro?** Selector que possibilita guardar ou não as ordenadas do espectro empírico.

**DBL** HSm Altura significativa à escala do modelo, em metros.

**DBL** HS Altura significativa real (protótipo), em metros.

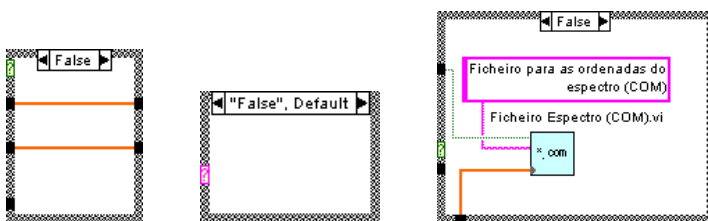
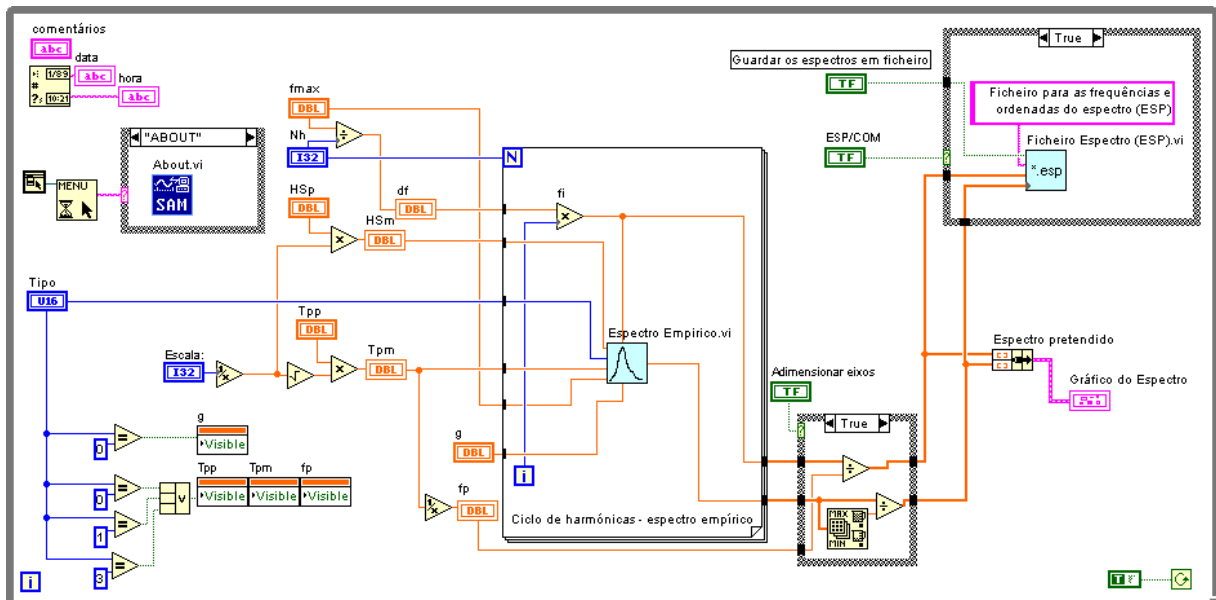
**I32** Nh N° de sinusóides de definição do espectro.

**UI6** **Tipo** Tipo de espectro empírico:  
 1 - JONSWAP-Goda ( $\gamma$ , HS, Tp);  
 2 - Pierson-Moskowitz GENERALIZADO (HS);  
 3 - Pierson-Moskowitz ITTC (HS, Tp);  
 4 - Bretschneider-Mitsuyasu (HS, Tp).

**DBL** Tpm Período médio de zero ascendente à escala do modelo, em segundos.

**DBL** Tp Período de pico do espectro real (protótipo), em segundos.

## CÓDIGO LABVIEW



## LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)



Espectro Empirico.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Espectro Empirico.vi



Ficheiro Espectro (COM).vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ficheiro Espectro (COM).vi



Ficheiro Espectro (ESP).vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ficheiro Espectro (ESP).vi



Info.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Info.vi

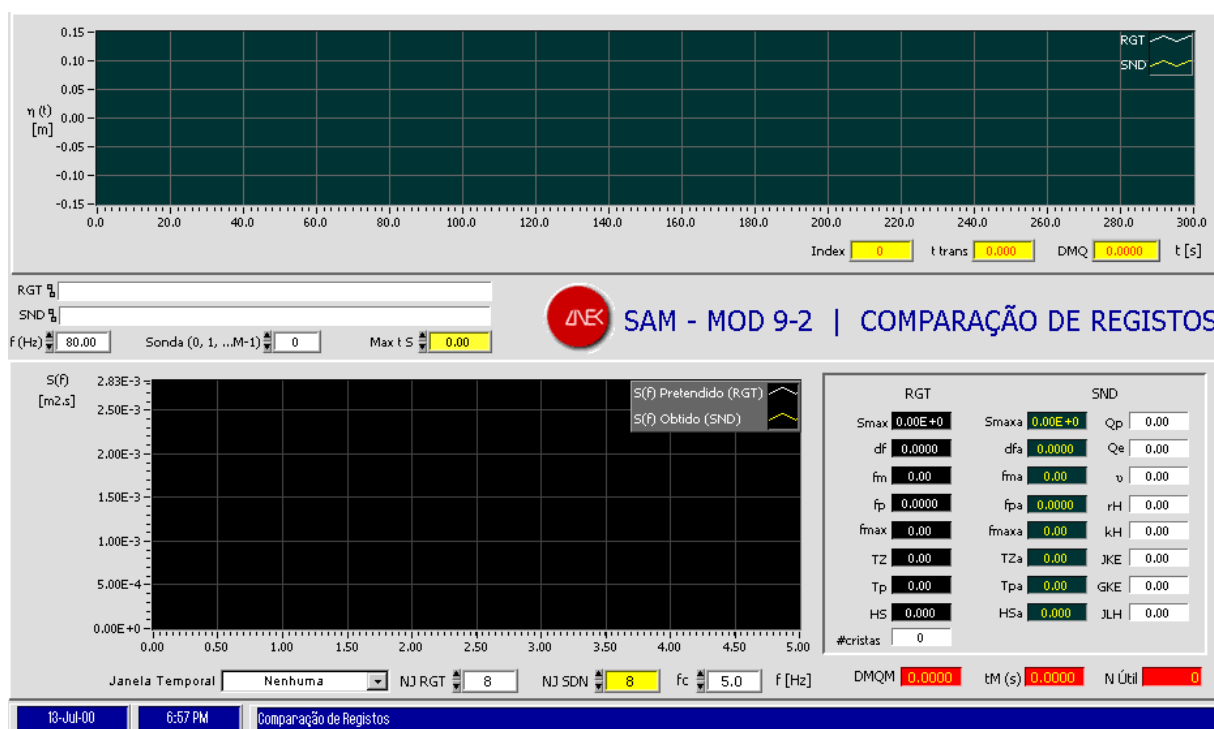




## SAM MOD 9-2 (COMPARAÇÃO DE REGISTOS).VI

Módulo que permite comparar registos da superfície da água e determinar o seu desvio médio quadrático. Permite, simultaneamente, provocar deslizes no tempo num dos registos e, assim determinar, o desvio médio quadrático mínimo.

### PAINEL PRINCIPAL



### CONTROLOS E INDICADORES

- I32** # **cristas** Número de cristas no sinal pretendido, para o nível  $H_c = HS/2$ .
- DBL** **v** Parâmetro adimensional de Longuet-Higgins, 1984, que mede a largura espectral. Quanto menor o valor de  $v$ , mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamento de ondas existe.
- DBL** **df** Intervalo entre frequências do espectro pretendido, em Hz. Utilizam-se  $N/2$  frequências harmónicas para que a frequência correspondente a  $N/2$  não ultrapasse a frequência de Nyquist.
- DBL** **dfa** Intervalo entre frequências do espectro obtido, em Hz. Utilizam-se  $N/2$  frequências harmónicas para que a frequência correspondente a  $N/2$  não ultra-

- passa a frequência de Nyquist.
- DBL** **DMQ** Desvio Médio Quadrático Instantâneo, correspondente ao deslize no tempo do registo SND.
- DBL** **DMQM** Desvio Médio Quadrático Mínimo, correspondente ao deslize  $tM$  no tempo do registo SND.
- FWI** **Espectros Gerado e Adquirido** Representação gráfica dos espectros dos sinais RGT e SDN.
- DBL** **f (Hz)** Frequência de amostragem de ambos os sinais, em Hz.
- DBL** **fc** Frequência de corte ou máxima na representação gráfica dos espectros, em Hertz ou ciclos/segundo. Em sinais da natureza, é costume considerar-se  $fc=0.5$  Hz, ao passo que à escala do canal (1/50) é costume usar-se  $fc=2$  Hz. Por outro lado,  $fc \leq f_{max}$ .
- DBL** **fm\*** Frequência mediana calculada através do espectro pretendido, em Hz.
- DBL** **fma** Frequência mediana calculada através do espectro obtido, em Hz.
- DBL** **fmax** Frequência máxima que o sinal pretendido poderá exibir, frequência de Nyquist.
- DBL** **fmaxa** Frequência máxima que o sinal obtido poderá exibir, frequência de Nyquist.
- DBL** **fp** Frequência de pico do espectro pretendido, a frequência que corresponde à máxima ordenada do espectro, em Hz.
- DBL** **fpa** Frequência de pico do espectro obtido, a frequência que corresponde à máxima ordenada do espectro, em Hz.
- DBL** **GKE** Número médio de ondas entre cada início de grupos de ondas (chorrilho total) utilizando a teoria Kimura Espectral, Kimura, 1980, Battjes e Vledder, 1984.
- DBL** **HS** Altura significativa calculada do espectro pretendido através da fórmula  $4 \cdot \sqrt{m_0}$ , em metros.
- DBL** **HSa** Altura significativa calculada do espectro obtido através da fórmula  $4 \cdot \sqrt{m_0}$ , em metros.
- I32** **Index** Índice correspondente ao deslize no tempo do registo SND.
- U16** **Janela Temporal** Filtro utilizado para análise espectral dos sinais temporais.
- DBL** **JKE** Número médio de ondas nos grupos de ondas utilizando o método de Kimura Espectral, Kimura, 1980, Battjes e Vledder, 1984.
- DBL** **JLH** Valor de  $E[J]$ , obtido pela fórmula de Longuet-Higgins, 1984. Varia com o nível considerado.
- DBL** **kH** Parâmetro adimensional devido a Battjes, 1974, e Battjes e Vledder, 1984, que mede a largura do espectro. Este parâmetro é importante no cálculo de  $p_{22}$  da teoria de Kimura Espectral, 1980, e está relacionado com o coeficiente de correlação entre ondas sucessivas,  $rH$ .
- DBL** **Max t S** Limite máximo do deslize no tempo para efeitos de comparação entre o registo pretendido (RGT) e o obtido numa dada sonda (0, 1, 2, ...) correspondente ao ficheiro \*.SND acima.

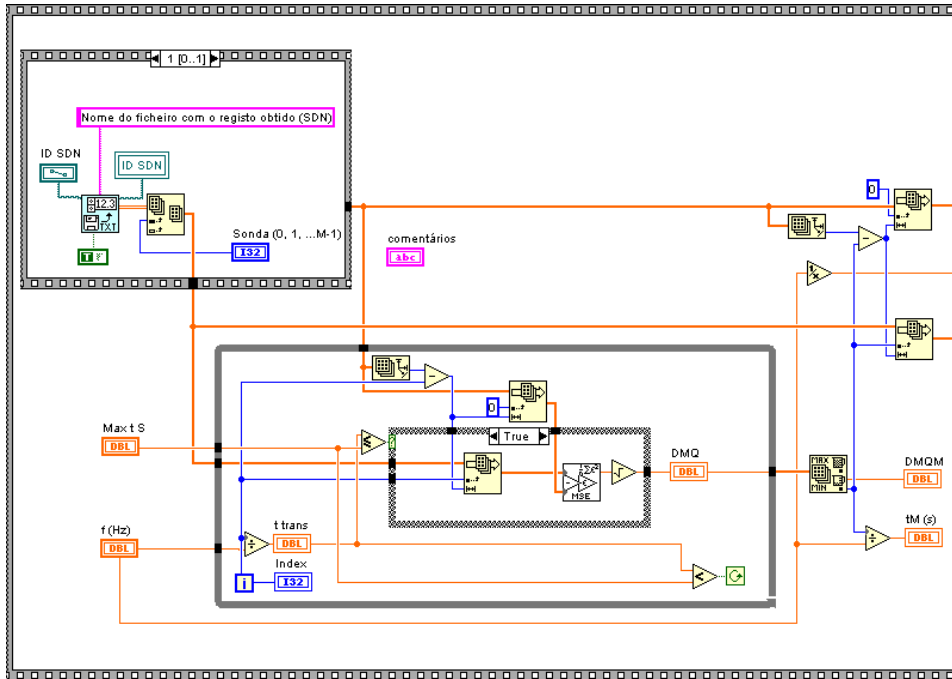
Para uma comparação simples (sem deslize no tempo),  $\text{Max } t S = 0$ .

OBS: O valor de  $\text{Max } t S$  depende da posição da sonda no canal. Este valor será tanto maior quanto mais distante do batedor estiver a sonda em questão. Uma primeira aproximação deste valor, para cada sonda, é determinada através do cálculo, da teoria linear, do tempo que leva uma onda com um período  $TZ$  leva a percorrer a referida distância entre o batedor e a sonda.

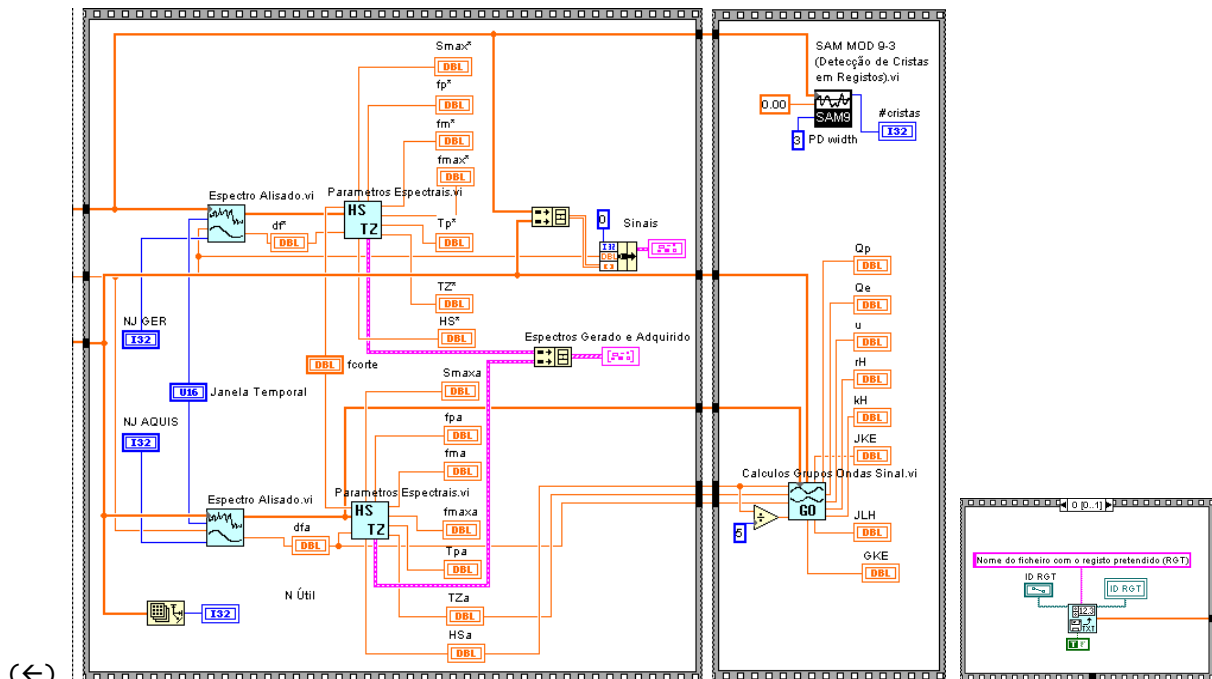
- I32** **N Útil** Número de pontos úteis da comparação após deslize no tempo.
- I32** **NJ RGT** Nº de pontos da semi-janela de Bartlett (triangular) considerada no alisamento do espectro pretendido. O espectro alisado é calculado através de uma média móvel de  $2*NJ+1$  pontos, ponderada triangularmente, e centrada no ponto de cálculo.
- I32** **NJ SND** Nº de pontos da semi-janela de Bartlett (triangular) considerada no alisamento do espectro obtido. O espectro alisado é calculado através de uma média móvel de  $2*NJ+1$  pontos, ponderada triangularmente, e centrada no ponto de cálculo.
- DBL** **Qe** Parâmetro espectral de Medina e Hudspeth, 1987, baseado em  $Qp$ , de Goda, 1970, o qual dá uma medida da largura espectral. Quanto maior o valor de  $Qe$ , mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamento de ondas existe.
- DBL** **Qp** Parâmetro espectral de Goda, 1970, que dá uma medida da largura espectral. Quanto maior o valor de  $Qp$ , mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamento de ondas existe.
- D=** **RGT** Identificação do ficheiro que contém o registo pretendido. No caso de este campo se encontrar vazio (o que acontece sempre que se inicia o programa), será perguntado o nome do ficheiro. Se a seguir se correr o programa em modo contínuo, não será necessário introduzir mais vezes este campo, a não ser evidentemente que se pretenda mudar de ficheiro.
- DBL** **rH** Aproximação do coeficiente de correlação entre ondas sucessivas, devida a Battjes, 1974, unicamente através do uso de informação espectral.
- DBL** **Smax** Máxima ordenada do espectro pretendido, em  $m^2/Hz$ .
- DBL** **Smaxa** Máxima ordenada do espectro obtido, em  $m^2/Hz$ .
- D=** **SND** Identificação do ficheiro que contém o registo obtido. No caso de este campo se encontrar vazio (o que acontece sempre que se inicia o programa), será perguntado o nome do ficheiro. Se a seguir se correr o programa em modo contínuo, não será necessário introduzir mais vezes este campo, a não ser evidentemente que se pretenda mudar de ficheiro.
- I32** **Sonda (0, 1, ...M-1)** Número da sonda (0, 1, 2, ...) correspondente ao ficheiro \*.SND acima.
- DBL** **t trans** Instante correspondente ao deslize no tempo do registo SND.
- DBL** **tM (s)** Deslize no tempo do registo SND que minimiza o desvio médio quadrático.
- DBL** **Tp** Período do pico do espectro pretendido, em segundos.
- DBL** **Tpa** Período do pico do espectro obtido, em segundos.
- DBL** **TZ** Período médio de zero ascendente calculado através do espectro pretendido, em segundos.

**DBL** TZa Período médio de zero ascendente calculado através do espectro obtido, em segundos.

### CÓDIGO LABVIEW



(→)



(←)

## LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)



Cálculos Grupos Ondas Sinal.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Cálculos Grupos Ondas Sinal.vi



Espectro Alisado.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Espectro Alisado.vi



Info.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Info.vi



Ler Folha Cálculo.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ler Folha Cálculo.vi



MSE.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\Analysis\5stat.11b\MSE.vi



Parâmetros Espectrais.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Parâmetros Espectrais.vi



SAM MOD 9-3 (Detecção de Cristas em Registos).vi  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 9-3 (Detecção de Cristas em Registos).vi

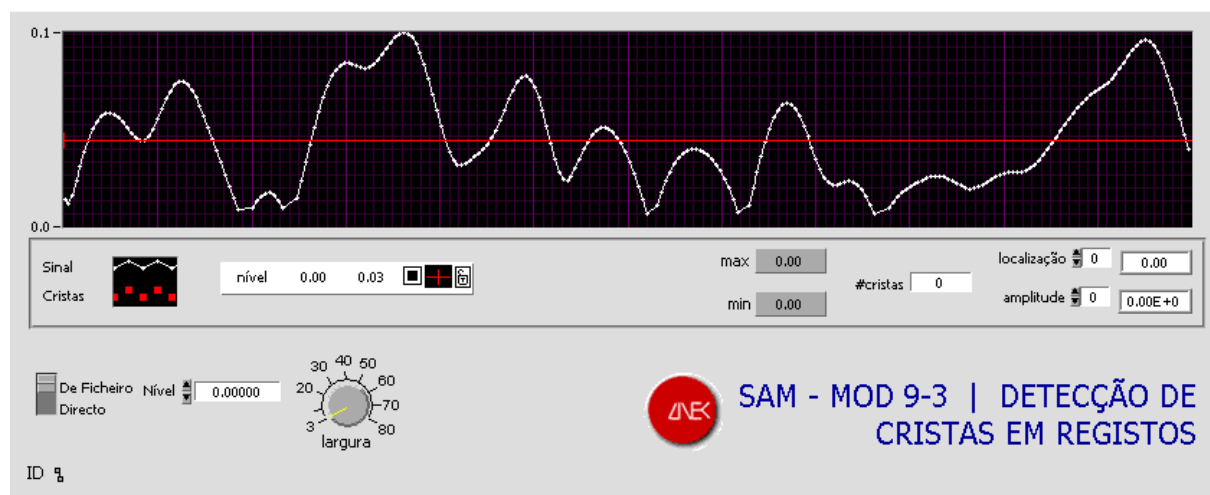


## SAM MOD 9-3 (DETECÇÃO DE CRISTAS EM REGISTOS).VI

Módulo de detecção de cristas num registo dado.



### PAINEL PRINCIPAL



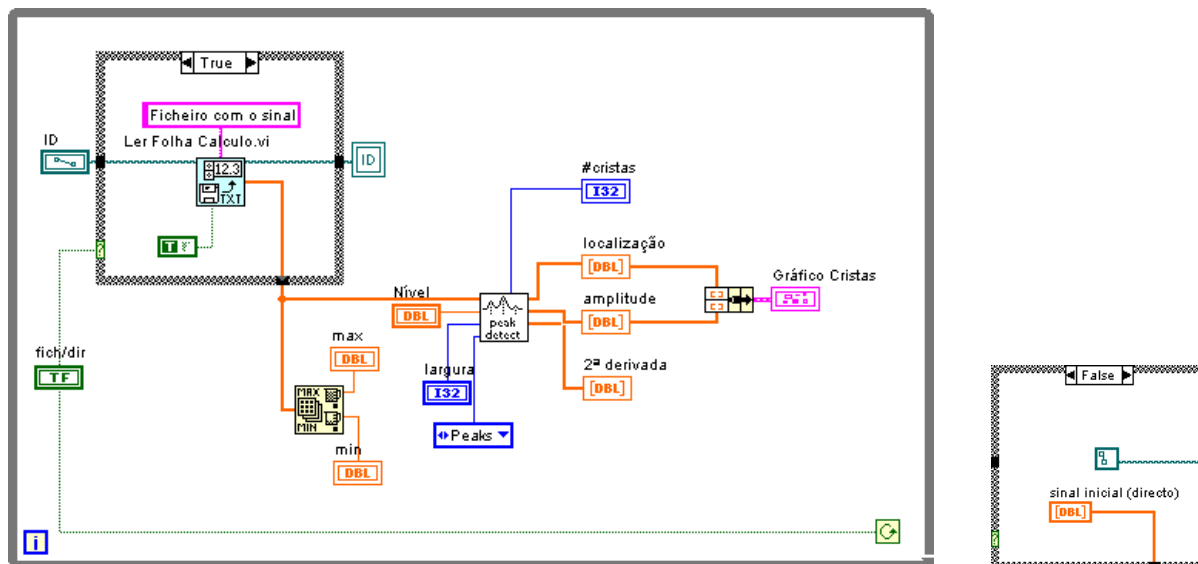
### CONTROLOS E INDICADORES

- [I32]** **# cristas** Número de cristas encontradas para o nível e largura dados.
- [DBL]** **Amplitude** Amplitudes das cristas correspondentes aos índices do indicador localização, acima.
- [TF]** **De Ficheiro/Directo** Selecção da origem do registo.
- [FTI]** **Gráfico Cristas** Representação gráfica do registo.
- [I32]** **largura** Número mínimo de pontos consecutivos para definição de uma crista..
- [DBL]** **localização** Localização (índice) das cristas.
- [DBL]** **max** Máximo de elevação do sinal dado.

**DBL** min Mínimo de elevação do sinal dado.

**DBL** Nivel Nível a partir do qual se considera existir uma crista..

## CÓDIGO LABVIEW



## LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)



Ler Folha Cálculo.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ler Folha Cálculo.vi

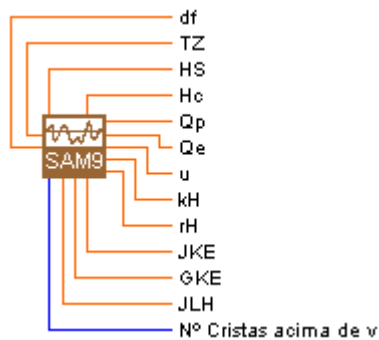


Peak Detector.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\Analysis\8numeric.lib\Peak Detector.vi



## SAM MOD 9-4 (CARACTERIZAÇÃO DE GRUPOS DE ONDA).VI

Módulo que permite caracterizar os grupos de ondas presentes num dado sinal.



### PAINEL PRINCIPAL

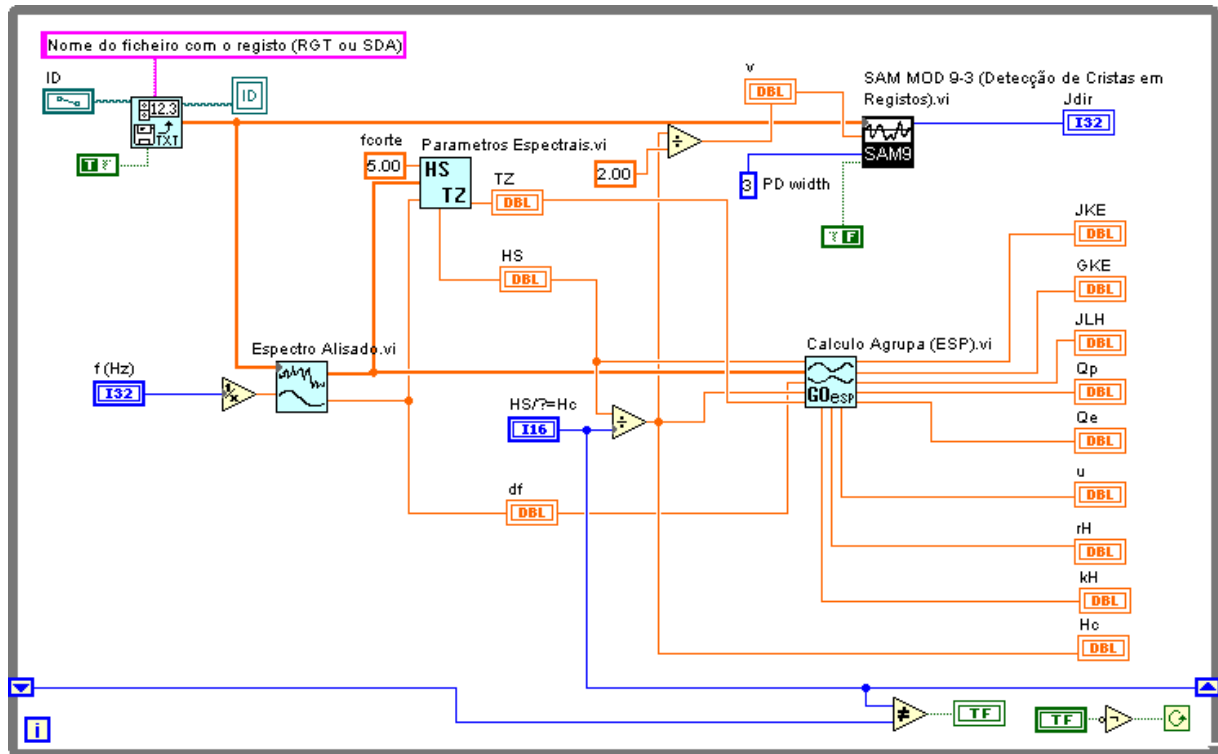
### CONTROLOS E INDICADORES

- DBL** v Parâmetro adimensional de Longuet-Higgins, 1984, que mede a largura espectral. Quanto menor o valor de v, mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamento de ondas existe.
- DBL** df Intervalo entre frequências
- I32** f(Hz) Frequência de amostragem, em Hz.



- DBL** **GKE** Número médio de ondas entre cada início de grupos de ondas (chorrilho total) utilizando a teoria Kimura Espectral, Kimura, 1980, Battjes e Vledder, 1984.
- DBL** **Hc** Altura de onda de grupo de ondas, que corresponde a um nível  $v$  a partir do qual se considera haver grupos de ondas, em metros.
- DBL** **HS** Altura significativa calculada do espectro obtido através da fórmula  $4 \cdot \sqrt{m_0}$ , em metros.
- I16** **HS/?=Hc** Nível de grupo de ondas, expresso em partes de altura significativa, isto é, o denominador do nível de agrupamento de ondas utilizado, sendo que o numerador é HS.
- ID** Identificação do ficheiro que contém o registo. No caso de este campo se encontrar vazio (o que acontece sempre que se inicia o programa), será perguntado o nome do ficheiro. Se a seguir se correr o programa em modo contínuo, não será necessário introduzir mais vezes este campo, a não ser evidentemente que se pretenda mudar de ficheiro.
- DBL** **JKE** Número médio de ondas nos grupos de ondas utilizando o método de Kimura Espectral, Kimura, 1980, Battjes e Vledder, 1984.
- DBL** **JLH** Valor de  $E[J]$ , obtido pela fórmula de Longuet-Higgins, 1984. Varia com o nível  $v$  (ou  $H_c$ ) considerado.
- DBL** **kH** Parâmetro adimensional devido a Battjes, 1974, e Battjes e Vledder, 1984, que mede a largura do espectro. Este parâmetro é importante no cálculo de  $p_{22}$  da teoria de Kimura, 1980, e está relacionado com o coeficiente de correlação entre ondas sucessivas,  $r_H$ .
- I32** **Nº Cristas acima de v** Número de cristas acima do nível  $v$ .
- TF** **OK** Botão indicativo de fim de cálculo em cada ciclo. Se estiver verde, significa que os cálculos já terminaram. Se estiver encarnado, ainda há cálculos a decorrer.
- DBL** **Qe** Parâmetro espectral de Medina e Hudspeth, 1987, baseado em  $Q_p$ , de Goda, 1970, o qual dá uma medida da largura espectral. Quanto maior o valor de  $Q_e$ , mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamento de ondas existe.
- DBL** **Qp** Parâmetro espectral de Goda, 1970, que dá uma medida da largura espectral. Quanto maior o valor de  $Q_p$ , mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamento de ondas existe.
- DBL** **rH** Aproximação do coeficiente de correlação entre ondas sucessivas, devida a Battjes, 1974, unicamente através do uso de informação espectral.
- TF** **Stop** Botão de paragem da execução.
- DBL** **TZ** Período médio de zero ascendente calculado através do espectro obtido, em segundos.
- DBL** **v** Nível a partir do qual se considera haver grupos de ondas, em metros =  $H_c/2$ .

## CÓDIGO LABVIEW



## LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)



Cálculo Agrupa (ESP).vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Cálculo Agrupa (ESP).vi



Espectro Alisado.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Espectro Alisado.vi



Ler Folha Cálculo.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ler Folha Cálculo.vi



Parâmetros Espectrais.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Parâmetros Espectrais.vi



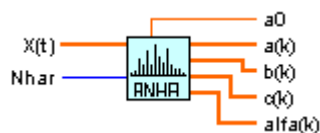
SAM MOD 9-3 (Detecção de Cristas em Registos).vi  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 9-3 (Detecção de Cristas em Registos).vi

## ANÁLISE HARMÓNICA.VI

Análise harmónica de um sinal temporal. Se o sinal é periódico, é evidentemente necessário que o número de valores a usar na análise harmónica corresponda a um número inteiro de períodos.

Das  $N_{har}$  harmónicas existentes, e para cada harmónica  $k$ , a que corresponde a frequência  $f(k)$ , a análise harmónica fornece as constantes  $a(k)$ ,  $b(k)$ ,  $c(k)$  e  $\alpha(k)$ , assim como as respectivas fases.

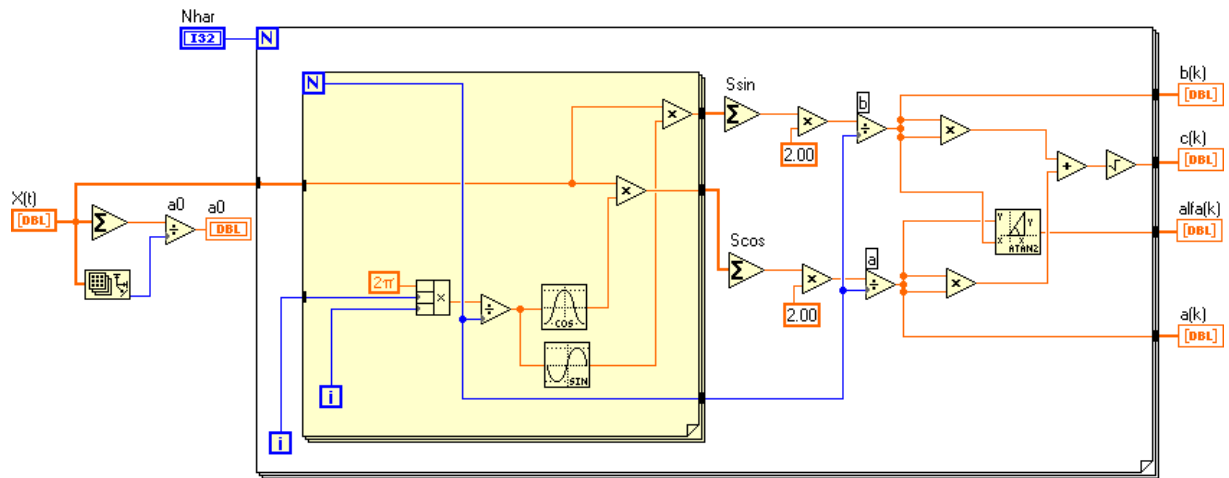
{Adaptado do programa AnHarm.PAS, por sua vez adaptado do programa ANHA.FOR de Mendes de Carvalho}



### CONTROLOS E INDICADORES

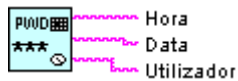
- DBL **a(k)** Coeficiente de Fourier correspondente à harmónica  $k$ .
- DBL **b(k)** Coeficiente de Fourier correspondente à harmónica  $k$ .
- DBL **c(k)** Coeficiente de Fourier correspondente à harmónica  $k$ .
- I32 **Nhar** Número de sinusóides
- DBL **X(t)** Sinal a analisar.

## CÓDIGO LABVIEW



## AUTENTICAÇÃO.VI

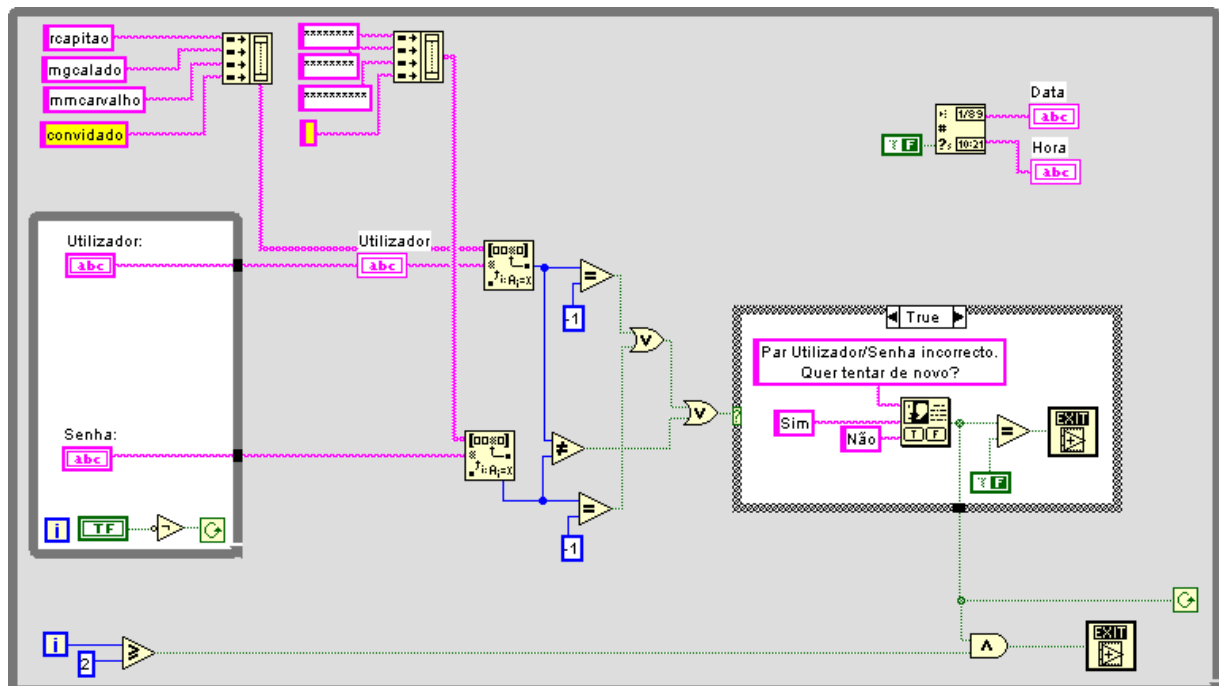
Módulo inicial que dá acesso ao pacote SAM, mediante autenticação do utilizador.



### CONTROLOS E INDICADORES

- abc Utilizador Nome do utilizador do pacote SAM
- abc Senha Código de segurança (password)
- abc Data Data actual.
- abc Hora Hora actual.

### CÓDIGO LABVIEW



## BARTLETT.VI

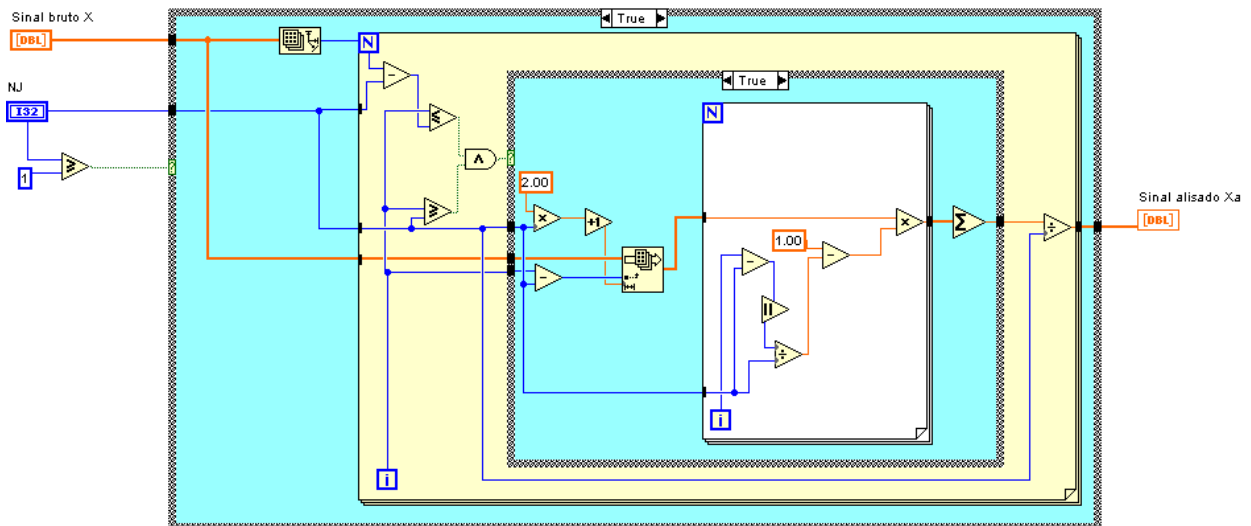
Janela de alisamento temporal triangular. Quanto mais pontos NJ se utilizarem, mais suave se torna o sinal bruto inicial.



### CONTROLOS E INDICADORES

- [I32]** NJ Nº de pontos da semi-janela de Bartlett.
- [DBL]** Sinal alisado Xa Sinal obtido após alisamento com NJ pontos de X.
- [DBL]** Sinal bruto X Sinal bruto no tempo ou na frequência.

### CÓDIGO LABVIEW



## BIESEL-SUQUET.VI

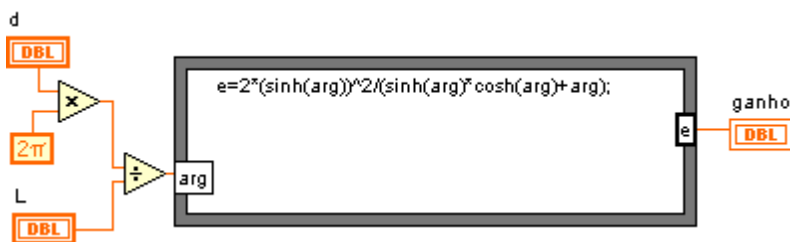
Cálculo do ganho do batedor de acordo com as fórmulas de Biésel e Suchet, Eqs. (5-9) e (5-10).



### CONTROLOS E INDICADORES

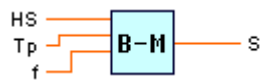
- DBL** **d** Profundidade da água no canal, em metros.  
OBS: Este parâmetro só é importante quando se pretende, para além da simulação numérica, a geração física.
- DBL** **ganho** Ganho do batedor de acordo com uma das fórmulas de Biésel e Suchet, Eqs. (5-9) ou (5-10)
- DBL** **L** Comprimento de Onda, de período T, à profundidade d

### CÓDIGO LABVIEW



## BRETSCHNEIDER-MITSUYASU.VI

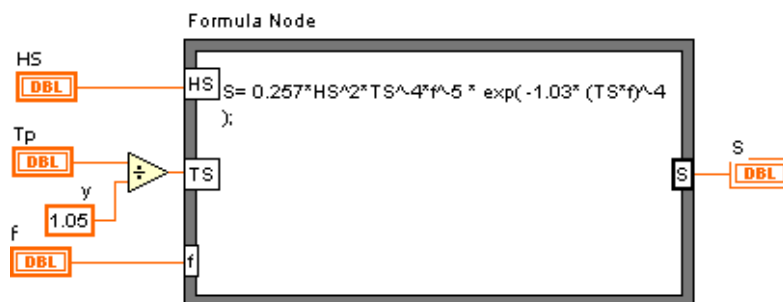
VI que calcula o espectro de JONSWAP-Goda - Anexo 2 - Definição de Espectros Empíricos.



### CONTROLOS E INDICADORES

- DBL** f Frequência
- DBL** HS Altura significativa
- DBL** S Ordenada do espectro
- DBL** Tp Período de pico do espectro, calculado de acordo com Goda, 1985:  
 $TS = T1/3 = 1 / (1.05 * fp)$

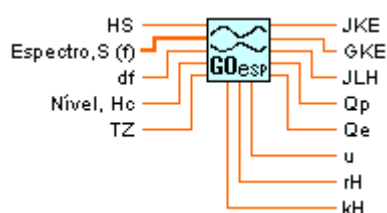
### CÓDIGO LABVIEW





## CÁLCULO AGRUPA (ESP).VI

Cálculo de parâmetros de grupos de ondas, quer unicamente dependentes do espectro, quer dependentes também da sequência de alturas de onda. Sub-módulo baseado no programa AGRUPA.PAS, em Pascal.

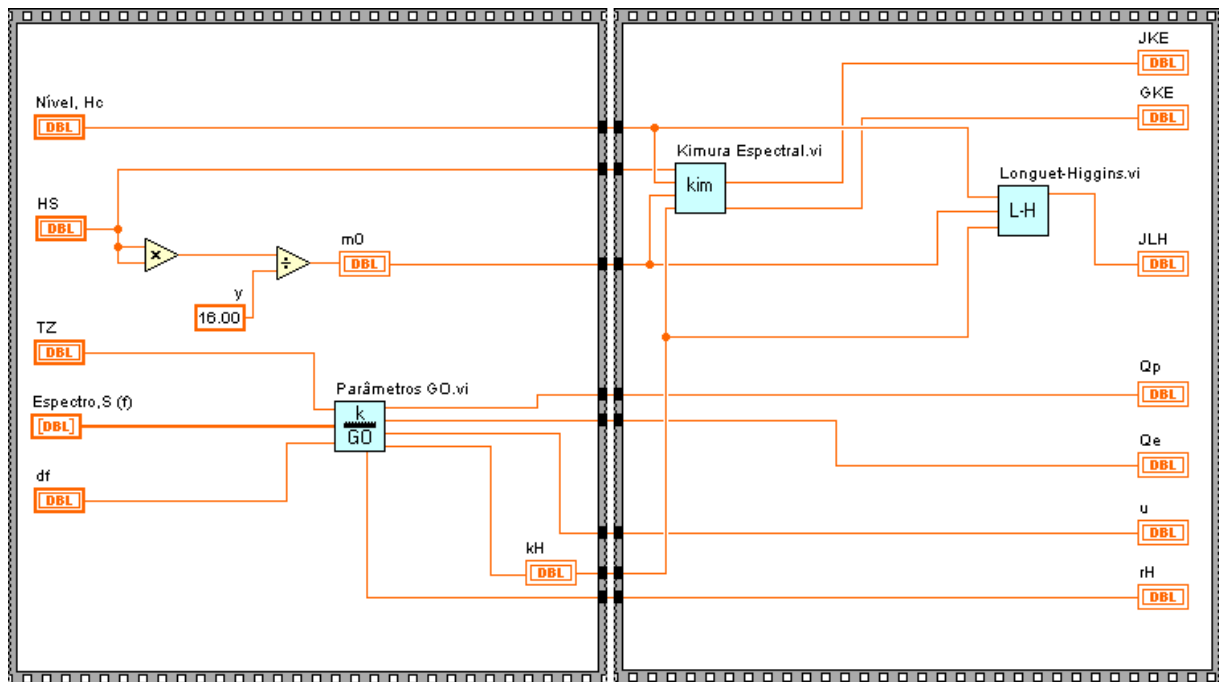


### CONTROLOS E INDICADORES

- DBL**  $v$  Parâmetro adimensional de Longuet-Higgins, 1984, que mede a largura espectral. Quanto menor o valor de  $v$ , mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamento de ondas existe.
- DBL**  $df$  Intervalo entre frequências.
- DBL** **Espectro, S(f)** Ordenadas do espectro.
- DBL** **GKE** Número médio de ondas entre cada início de grupos de ondas (chorrilho total) utilizando a teoria Kimura Espectral, Kimura, 1980, Battjes e Vledder, 1984.
- DBL** **HS** Altura significativa, em metros.
- DBL** **JKE** Número médio de ondas nos grupos de ondas utilizando o método de Kimura Espectral, Kimura, 1980, Battjes e Vledder, 1984.
- DBL** **JLH** Valor de  $E[J]$ , obtido pela fórmula de Longuet-Higgins, 1984. Varia com o nível considerado.
- DBL** **kH** Parâmetro adimensional devido a Battjes, 1974, e Battjes e Vledder, 1984, que mede a largura do espectro. Este parâmetro é importante no cálculo de  $p_{22}$  da teoria de Kimura Espectral, 1980, e está relacionado com o coeficiente de correlação entre ondas sucessivas,  $rH$ .
- DBL** **m0** Momento de ordem zero, ou seja, a área do espectro.
- DBL** **Nível, Hc** Altura de grupo de ondas, ou seja,  $2 \cdot \text{nível de grupo de ondas (v) - threshold level}$ .
- DBL** **Qe** Parâmetro espectral de Medina e Hudspeth, 1987, baseado em  $Qp$ , de Goda, 1970, o qual dá uma medida da largura espectral. Quanto maior o valor de  $Qe$ , mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamento de ondas existe.

- DBL** **Qp** Parâmetro espectral de Goda, 1970, que dá uma medida da largura espectral. Quanto maior o valor de Qp, mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamento de ondas existe.
- DBL** **rH** Aproximação do coeficiente de correlação entre ondas sucessivas, devida a Battjes, 1974, unicamente através do uso de informação espectral.
- DBL** **TZ** Período médio de zero ascendente, em segundos.

## CÓDIGO LABVIEW

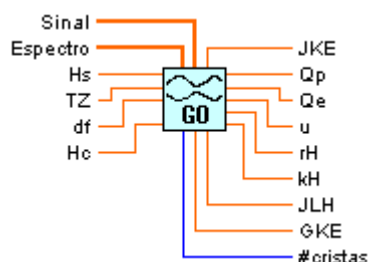


## LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)

- kim** Kimura Espectral.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Kimura Espectral.vi
- L-H** Longuet-Higgins.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Longuet-Higgins.vi
- k  
GO** Parâmetros GO.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Parâmetros GO.vi

## CÁLCULOS GRUPOS ONDAS SINAL.VI

Sub-módulo auxiliar de cálculo de vários parâmetros de caracterização de grupos de ondas.

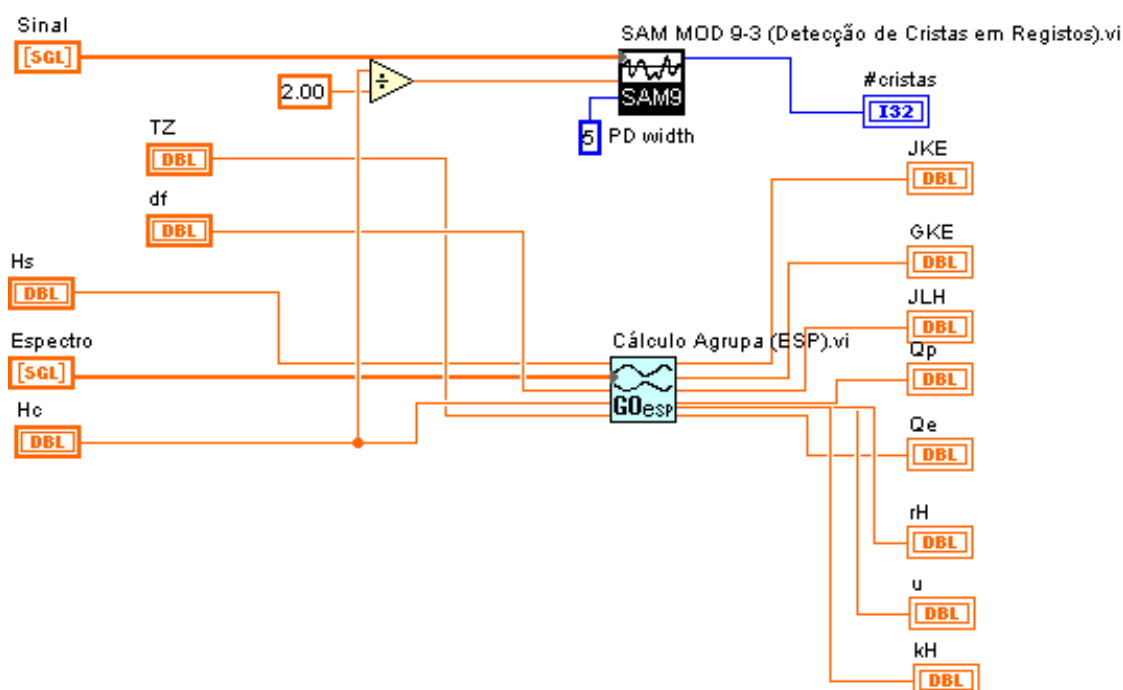


### CONTROLOS E INDICADORES



- 132 # **cristas** Número de cristas acima do nível  $v$ .
- DBL **v** Parâmetro adimensional de Longuet-Higgins, 1984, que mede a largura espectral. Quanto menor o valor de  $v$ , mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamento de ondas existe.
- DBL **df** Intervalo entre frequências.
- SGL **Espectro** Ordenadas do espectro.
- DBL **GKE** Número médio de ondas entre cada início de grupos de ondas (chorrilho total) utilizando a teoria Kimura Espectral, Kimura, 1980, Battjes e Vledder, 1984.
- DBL **Hc** Altura de onda de grupo de ondas, que corresponde a um nível  $v$  a partir do qual se considera haver grupos de ondas, em metros.
- DBL **HS** Altura Significativa.
- DBL **JKE** Número médio de ondas nos grupos de ondas utilizando o método de Kimura Espectral, Kimura, 1980, Battjes e Vledder, 1984.
- DBL **JLH** Valor de  $E[J]$ , obtido pela fórmula de Longuet-Higgins, 1984. Varia com o nível considerado.
- DBL **kH** Parâmetro adimensional devido a Battjes, 1974, e Battjes e Vledder, 1984, que mede a largura do espectro. Este parâmetro é importante no cálculo de  $p_{22}$  da teoria de Kimura Espectral, 1980, e está relacionado com o coeficiente de correlação entre ondas sucessivas,  $rH$ .
- DBL **Qe** Parâmetro espectral de Medina e Hudspeth, 1987, baseado em  $Qp$ , de Goda, 1970, o qual dá uma medida da largura espectral. Quanto maior o valor de  $Qe$ , mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamento de ondas existe.

- [DBL]** **Qp** Parâmetro espectral de Goda, 1970, que dá uma medida da largura espectral. Quanto maior o valor de Qp, mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamento de ondas existe.
- [DBL]** **rH** Aproximação do coeficiente de correlação entre ondas sucessivas, devida a Battjes, 1974, unicamente através do uso de informação espectral.
- [SGL]** **Sinal** Registo a analisar.
- [DBL]** **TZ** Período médio.

## CÓDIGO LABVIEW



## LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)

-  **Cálculo Agrupa (ESP).vi**  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Cálculo Agrupa (ESP).vi
-  **SAM MOD 9-3 (Detecção de Cristas em Registos).vi**  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 9-3 (Detecção de Cristas em Registos).vi

## COMPRIMENTO ONDA APROXIMADO.VI

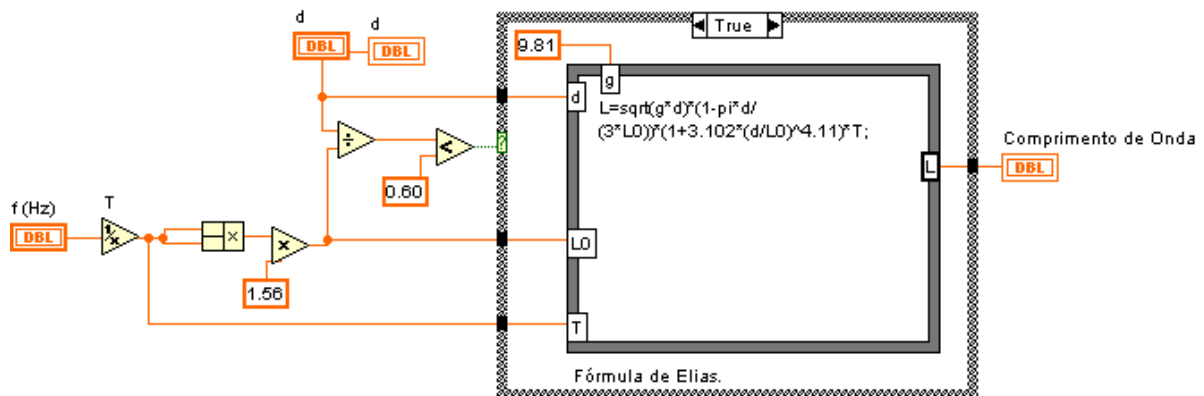
Cálculo do comprimento de onda de acordo com a Eq. (2-37), Elias, 1984 -  $T=TR/k$ .  
 Calcula-se em primeiro lugar o comprimento de onda em águas profundas,  $L_0$ , Eq. (2-36), e só depois o  $L$ , dados a profundidade,  $d$ , e a frequência,  $f$ .



### CONTROLOS E INDICADORES

- DBL d Profundidade do canal, em m.
- DBL f Frequência da onda.
- DBL L Comprimento de Onda

### CÓDIGO LABVIEW





## CUIDADO COM O MÁXIMO.VI

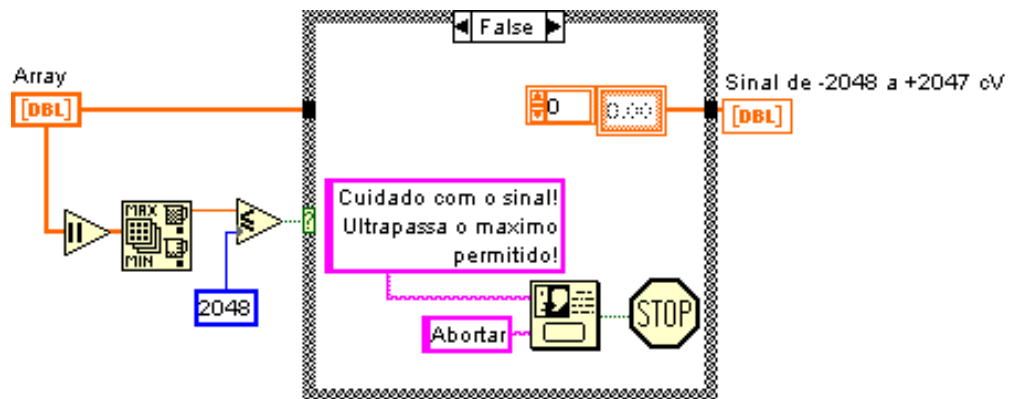
Rotina de verificação.



### CONTROLOS E INDICADORES

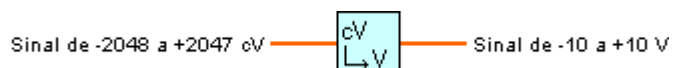
- DBL Array Vector com o sinal inicial
- DBL Sinal de -2048 a +2047 cV Sinal limitado

### CÓDIGO LABVIEW





## cV (2048) A V (10).VI

Rotina de transformação de unidades.

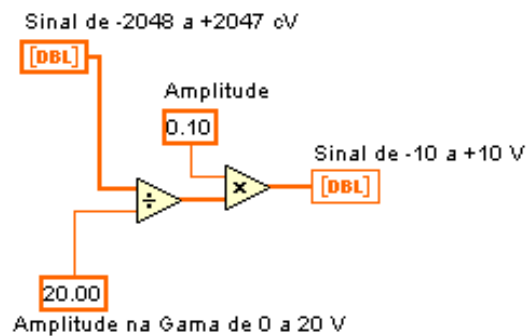


### CONTROLOS E INDICADORES

 Sinal de -10 a +10 V Sinal limitado

 Sinal de -2048 a +2047 cV Sinal limitado

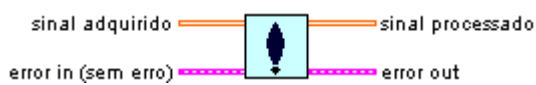
### CÓDIGO LABVIEW









## DETECTAR ERROS.VI

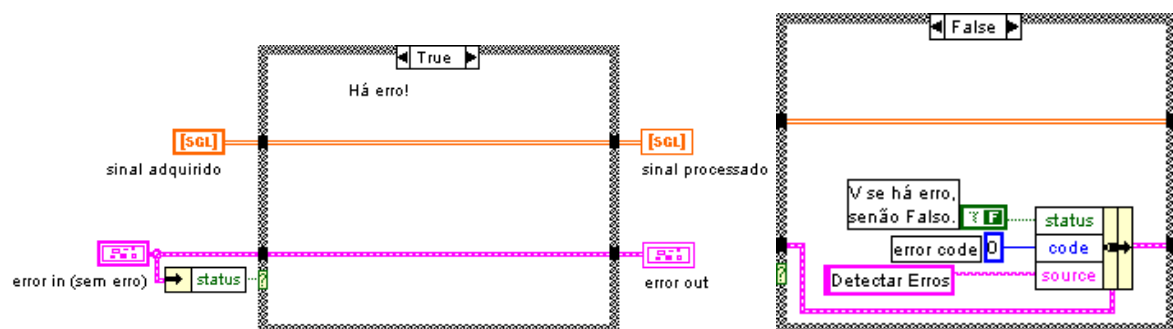
Sub-módulo de processamento de erros na aquisição. O indicador “Error in” é um “cluster” que indica ocorrência de erros na aquisição. Se isso acontecer, o VI em questão não processa mais dados, abortando a operação.



### CONTROLOS E INDICADORES

-  **error in (sem erro)** Descrição do erro (em princípio, sem erro).
-  **error out** Descrição do erro de saída (se houver algum).
-  **sinal adquirido** Valores em Volts da aquisição – a primeira dimensão corresponde ao instante de aquisição e a segunda ao canal (sonda) associado.
-  **sinal processado** Valores em Volts após processamento.

### CÓDIGO LABVIEW



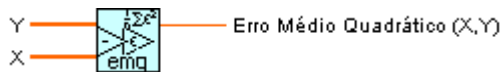
## EMQ.VI

Fórmula do Desvio Médio Quadrático entre duas funções quaisquer X e Y.

$$EMQ = (\text{Sum}\{(x[i]-y[i])^2\})/n$$

onde

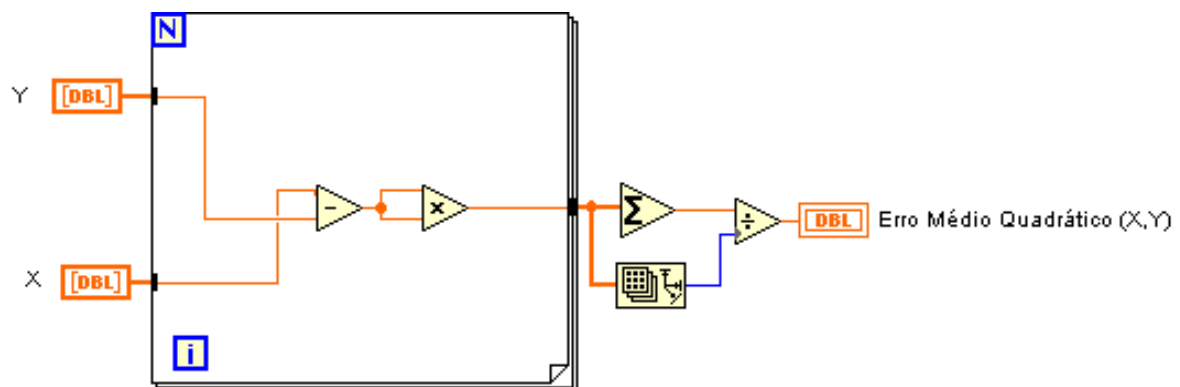
x é o *array* de valores de X  
 y é o *array* de valores de Y  
 n é o nº de pontos



### CONTROLOS E INDICADORES

- [DBL]** Erro Médio Quadrático (X,Y) Desvio Médio Quadrático entre X e Y.
- [DBL]** X é o *array* de valores de X.
- [DBL]** Y é o *array* de valores de Y.

### CÓDIGO LABVIEW



## ENVOLVENTE REIA.VI

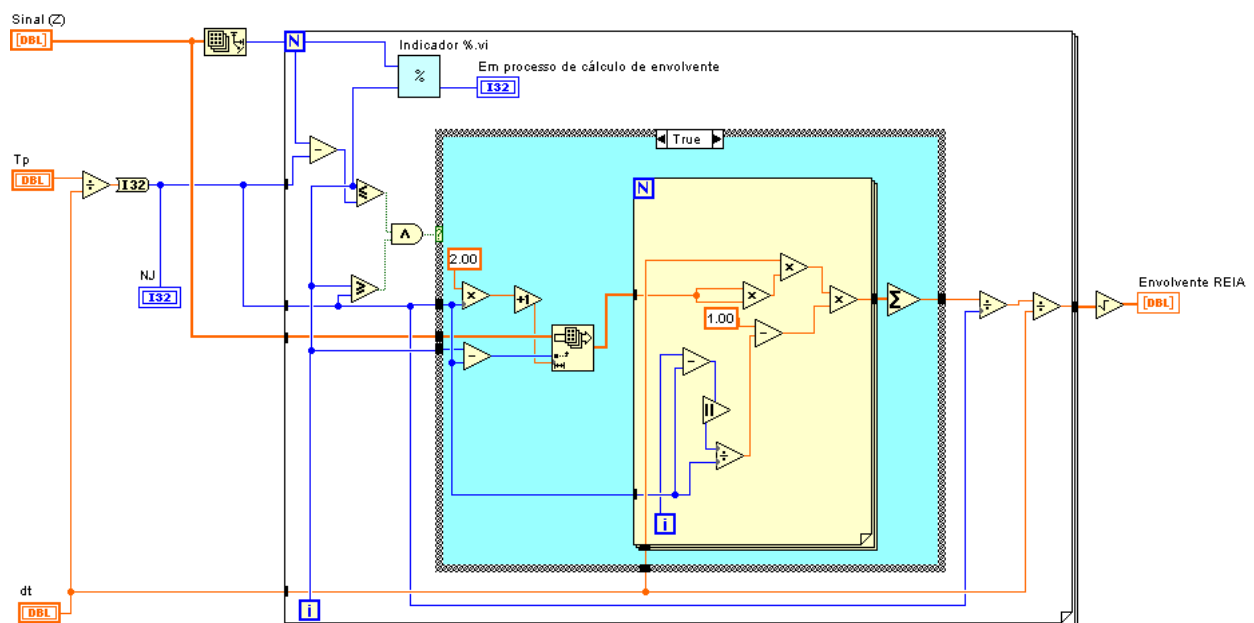
Cálculo da envolvente REIA, Eq. (3-49), com utilização de uma janela de alisamento triangular ou de Bartlett.



### CONTROLOS E INDICADORES

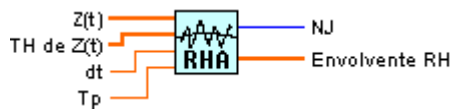
- DBL dt Intervalo de tempo entre observações.
- DBL **Envolvente REIA** Função envolvente calculada através da Raiz quadrada da Energia Instantânea Alisada (SIWEH)
- I32 NJ Nº de pontos da semi-janela de Bartlett (triangular).
- DBL Sinal (Z) Sinal bruto no tempo ou na frequência.
- DBL Tp Período de pico.

### CÓDIGO LABVIEW



## ENVOLVENTE RHA.VI

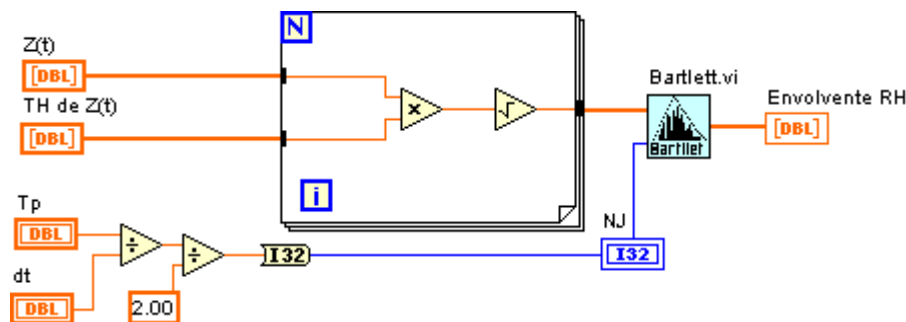
Cálculo da envolvente de Rice-Hilbert (Eq. (3-43)), com alisamento, RHA, e com utilização de uma janela de alisamento triangular (Bartlett).




### CONTROLOS E INDICADORES

- DBL **dt** Intervalo de tempo entre observações.
- DBL **Envolvente RH** Função envolvente calculada da maneira clássica através da Transformada de Hilbert.
- I32 **NJ** N° de pontos da semi-janela de Bartlett (triangular).
- DBL **TH de Z(t)** Transformada de Hilbert do sinal inicial.
- DBL **Tp** Período de pico.
- DBL **Z(t)** Sinal bruto no tempo ou na frequência.

### CÓDIGO LABVIEW

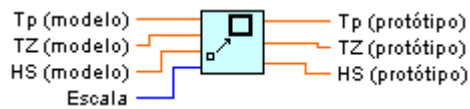


### LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)

-  **Bartlett.vi**  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Bartlett.vi

## ESCALAR MODELO-PROTÓTIPO.VI

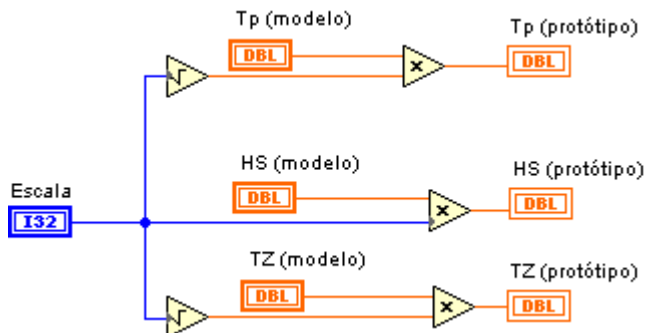
Transformação da escala do modelo para a escala do protótipo, de acordo com as Eqs. (5-1) e (5-2).



### CONTROLOS E INDICADORES

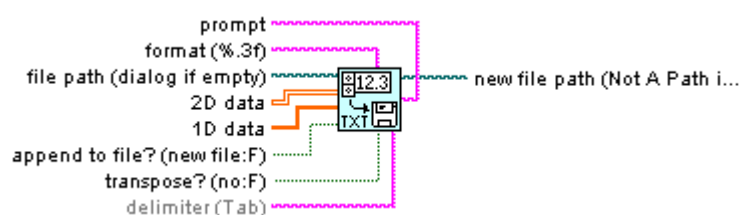
- I32** Escala Escala gráfica.
- DBL** HS (modelo) Altura significativa do modelo.
- DBL** HS (protótipo) Altura significativa do protótipo.
- DBL** Tp (modelo) Período de pico do modelo.
- DBL** Tp (protótipo) Período de pico do protótipo.
- DBL** TZ (modelo) Período médio do modelo.
- DBL** TZ (protótipo) Período médio do protótipo.

### CÓDIGO LABVIEW



## ESCREVER FOLHA CÁLCULO.VI

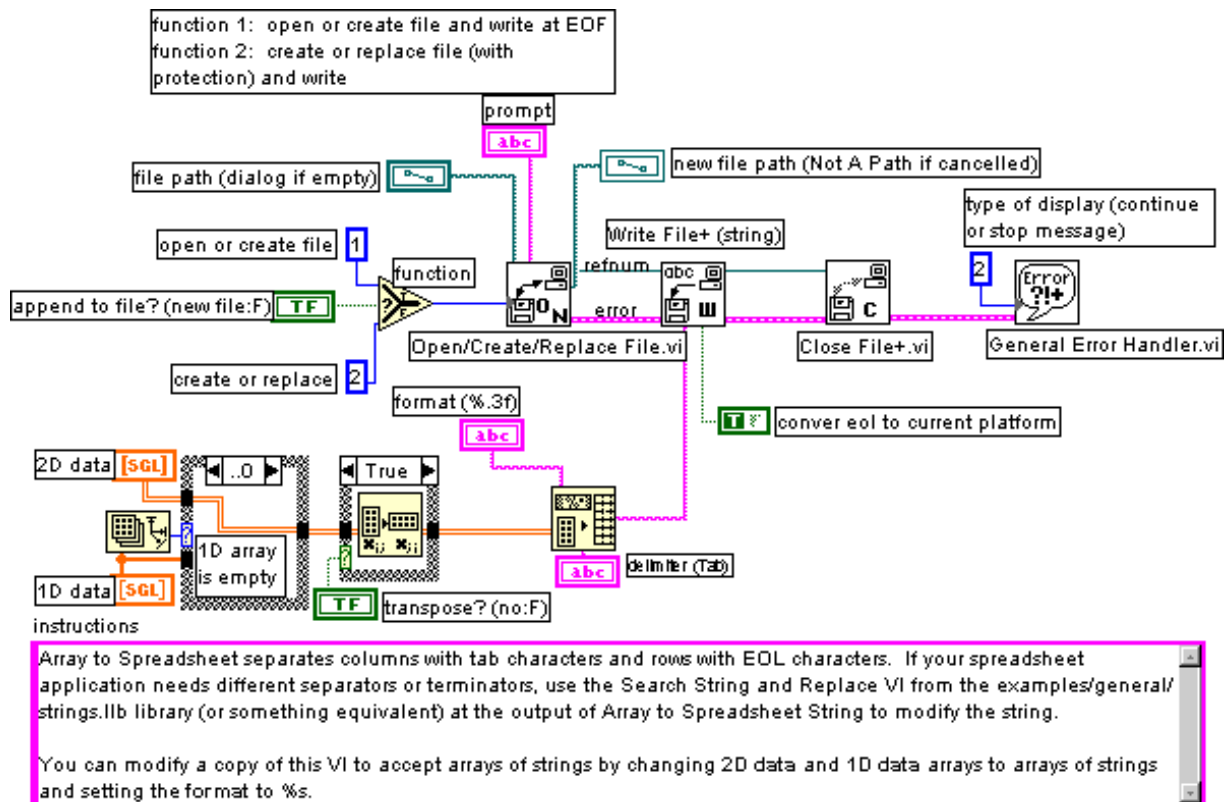
Adaptação do VI da biblioteca de rotinas incluída no pacote LabVIEW, “Write Spreadsheet.vi”. Este VI, modificado, converte vectores 1D ou 2D de valores reais em “strings” numa folha de cálculo (spreadsheet).



### CONTROLOS E INDICADORES

- [SGL] **1D data** Vector unidimensional que contém os valores reais.
- [SGL] **2D data** Vector bidimensional que contém os valores reais.
- [TF] **append to file? (new file:F)** Permite juntar os valores do vector a um ficheiro já existente.
- [abc] **delimiter (Tab)** Tipo de delimitador (por omissão, é um “tab”).
- [D-og] **file path (dialog if empty)** Caminho do ficheiro a escrever.
- [abc] **format (%.3f)** Formato dos valores a introduzir na folha de cálculo.
- [D-og] **new file path (Not A Path if cancelled)** Novo caminho do ficheiro.
- [abc] **Prompt** Mensagem dada ao utilizador.
- [TF] **transpose? (no:F)** Selector que permite a inversão da matriz antes da escrita na folha de cálculo.

## CÓDIGO LABVIEW



## LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)



Close File+.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\Utility\file.lib\Close File+.vi



General Error Handler.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\Utility\error.lib\General Error Handler.vi



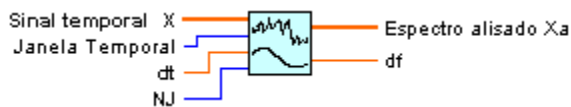
Open/Create/Replace File.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\Utility\file.lib\Open/Create/Replace File.vi



Write File+ (string).vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\Utility\file.lib\Write File+ (string).vi

## ESPECTRO ALISADO.VI

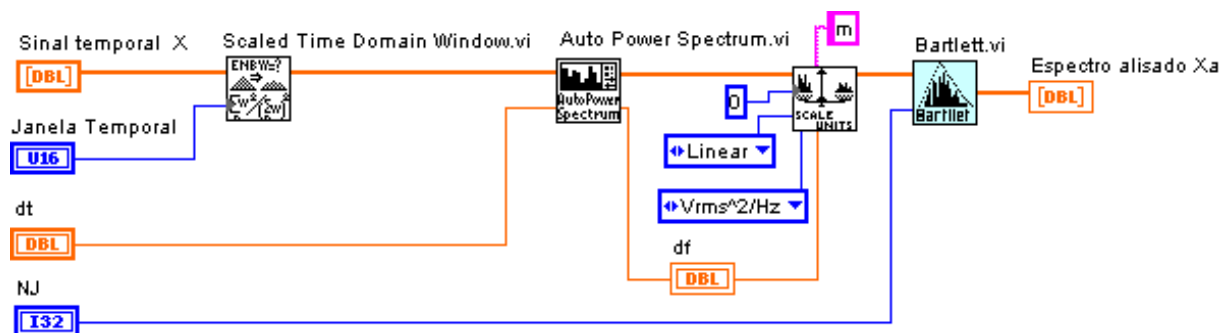
Dado um sinal temporal  $X(t)$ , registado a intervalos regulares distanciados de  $dt$ , calcula-se o espectro de variância, utilizando-se, para isso, funções internas do LabVIEW, e alisa-se com  $NJ$  pontos através de uma janela triangular (de Bartlett).



### CONTROLOS E INDICADORES

- DBL **df** Intervalo entre frequências do espectro, em Hz. Utilizam-se  $N/2$  frequências harmônicas para que a frequência correspondente a  $N/2$  não ultrapasse a Frequência de Nyquist.
- DBL **dt** Intervalo de tempo entre observações
- DBL **Espectro alisado Xa** Espectro (alisado) do sinal temporal inicial.
- U16 **Janela Temporal** Filtro utilizado para análise espectral dos sinais temporais.
- I32 **NJ** Nº de pontos da semi-janela de Bartlett (triangular) considerada no alisamento do espectro obtido. O espectro alisado é calculado através de uma média móvel de  $2*NJ+1$  pontos, ponderada triangularmente, e centrada no ponto de cálculo.
- DBL **Sinal temporal X** Sinal no tempo.

### CÓDIGO LABVIEW





## LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)



Auto Power Spectrum.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\Analysis\0measdsp.11b\Auto Power Spectrum.vi



Bartlett.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Bartlett.vi



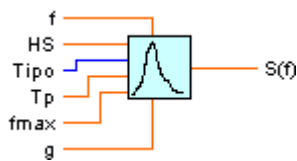
Scaled Time Domain Window.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\Analysis\0measdsp.11b\Scaled Time Domain Window.vi



Spectrum Unit Conversion.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\Analysis\0measdsp.11b\Spectrum Unit Conversion.vi

## ESPECTRO EMPÍRICO.VI

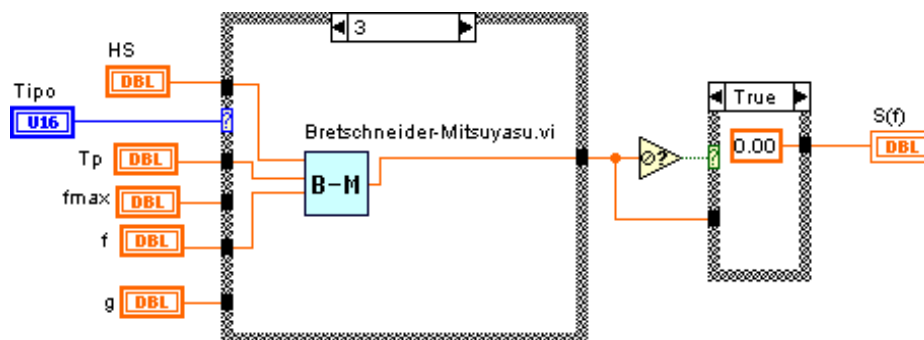
Criação de um espectro empírico, dados o Tipo (JONSWAP, P-M generalizado ou ITTC, ruído branco), e os parâmetros  $\gamma$  e/ou HS e/ou Tp.

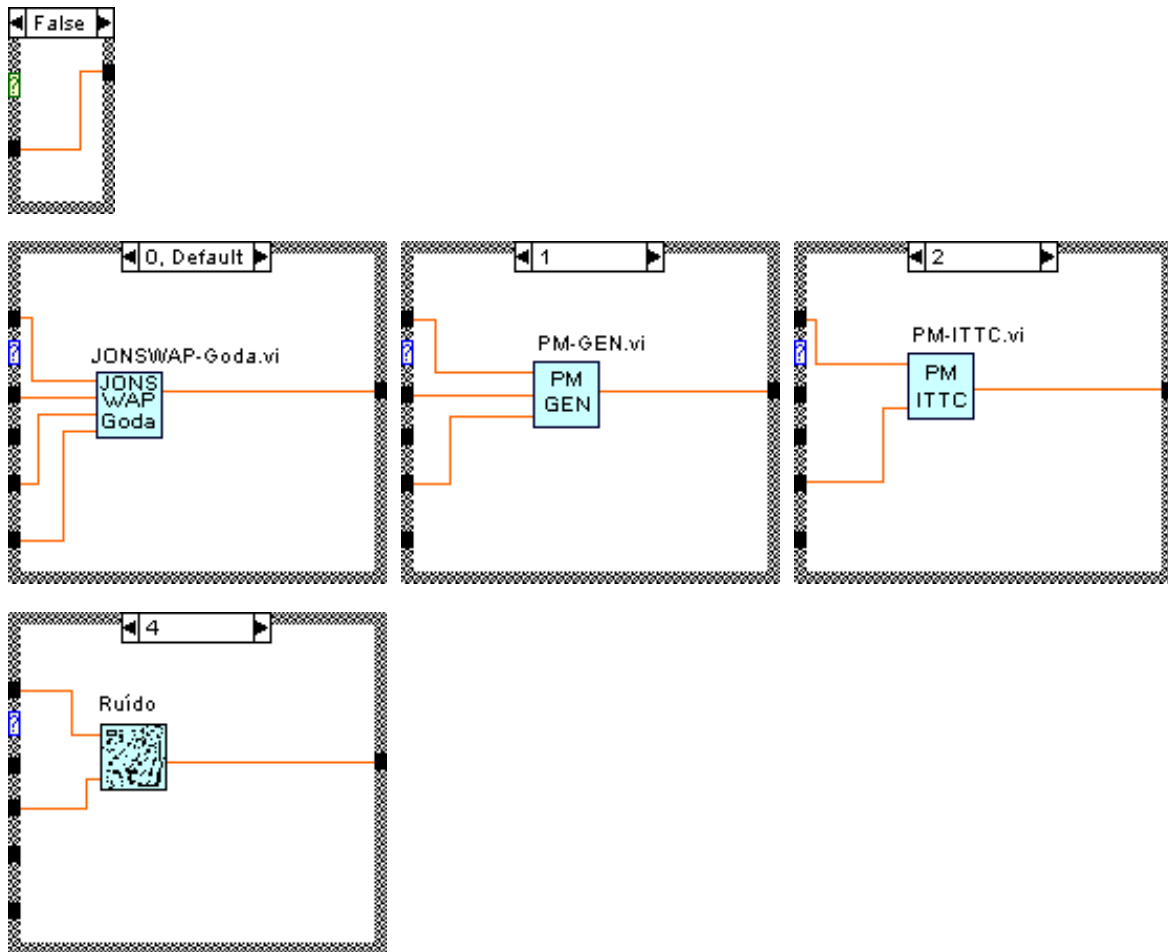


### CONTROLOS E INDICADORES






- DBL** f Frequência.
- DBL** fmax Frequência máxima do espectro, em Hertz.
- DBL**  $\gamma$  Parâmetro do espectro JONSWAP.
- DBL** HS Altura significativa real, em metros.
- DBL** S(f) Espectro empírico, com as características pretendidas.
- U16** Tipo Tipo de espectro empírico:
  - 1 - JONSWAP-Goda ( $\gamma$ , HS, Tp);
  - 2 - Pierson-Moskowitz GENERALIZADO (HS);
  - 3 - Pierson-Moskowitz ITTC (HS, Tp);
  - 4 - Bretschneider-Mitsuyasu (HS, Tp).
- DBL** Tp Período de pico do espectro real, em segundos.

### CÓDIGO LABVIEW



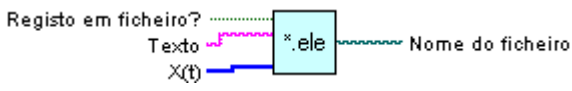
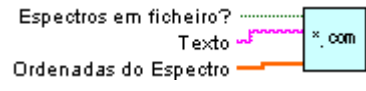
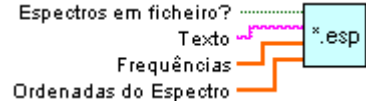
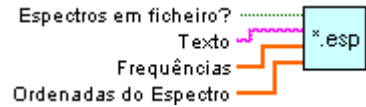
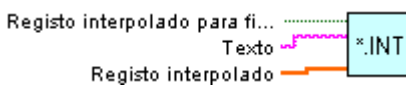
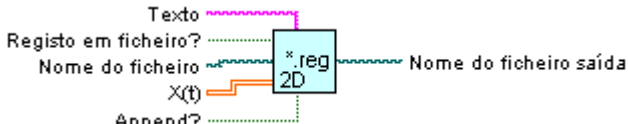
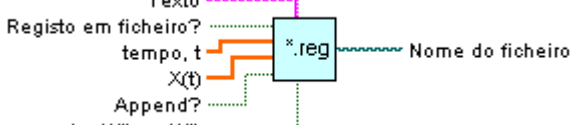


### LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)

|   |  |
|---|--|
|  | Bretschneider-Mitsuyasu.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Bretschneider-Mitsuyasu.vi |
|  | JONSWAP-Goda.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\JONSWAP-Goda.vi                       |
|  | PM-GEN.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\PM-GEN.vi                                   |
|  | PM-ITTC.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\PM-ITTC.vi                                 |
|  | Ruído Branco.vi<br>C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ruído Branco.vi                       |

## FICHEIRO COMANDO.VI, FICHEIRO ESPECTRO (COM).VI, FICHEIRO ESPECTRO (ESP).VI, FICHEIRO ESPECTRO.VI, FICHEIRO REGISTO (INT).VI, FICHEIRO REGISTO AQUISIÇÃO 2D.VI, FICHEIRO REGISTO.VI

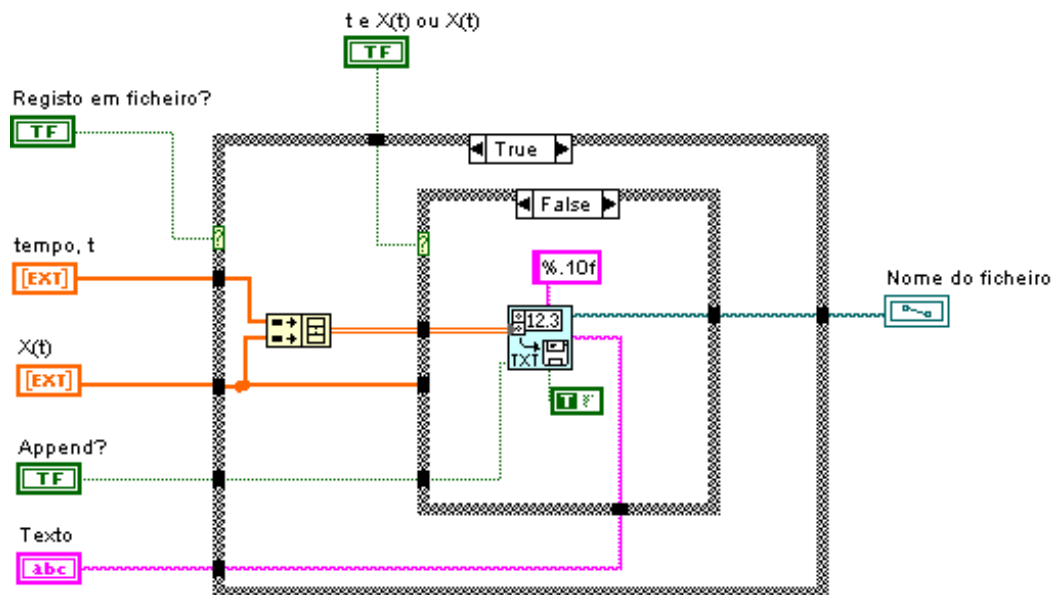
Conjunto de rotinas de criação de ficheiros de texto (formato ASCII) com registos (1D - elevações da superfície, ou 2D - instantes do tempo e elevações da superfície), ou com espectros (1D - ordenadas do espectro - ou 2D - frequências e ordenadas do espectro).

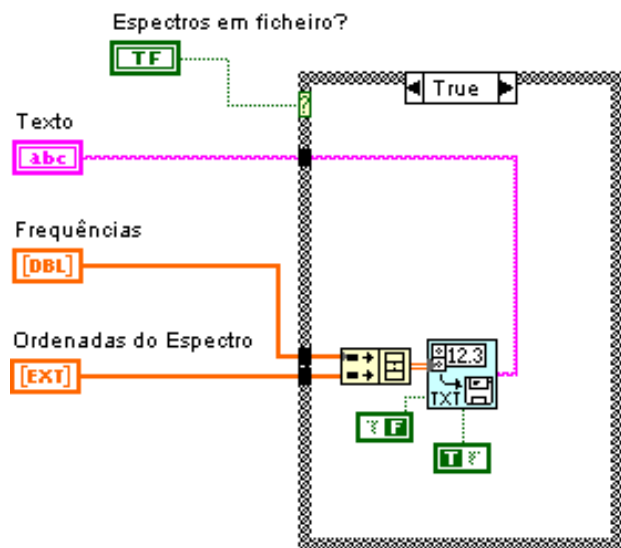
|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| Ficheiro comando.vi              |   |
| Ficheiro espectro (com).vi       |  |
| Ficheiro espectro (esp).vi       |  |
| Ficheiro espectro.vi             |  |
| Ficheiro registo (int).vi        |  |
| Ficheiro registo aquisição 2d.vi |  |
| Ficheiro registo.vi              |  |

## CONTROLOS E INDICADORES


- [TF]** **Espectros em ficheiro?** Selector que possibilita guardar ou não as ordenadas do espectro empírico e do espectro obtido após TF num ficheiro, geralmente de extensão ESP.
- [DBL]** **Frequências** Vector contendo as frequências.
- [TF]** **Registo em ficheiro?** Selector que possibilita guardar ou não os valores do registo simulado (duas colunas - tempo e elevação) num ficheiro, geralmente de extensão REG.
- [TF]** **Registo interpolado para ficheiro?** Selector que possibilita guardar ou não as ordenadas do espectro empírico e do espectro obtido após TF num ficheiro, geralmente de extensão ESP.
- [abc]** **Texto** Mensagem que aparece ao utilizador.
- [EXT]** **X(t)** Registo das elevações da superfície.

## CÓDIGO LABVIEW (TÍPICO)



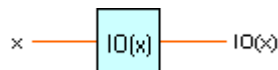


### LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)

-  Escrever Folha Cálculo.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Escriver Folha Cálculo.vi

## FUNÇÃO BESSEL (IO).VI

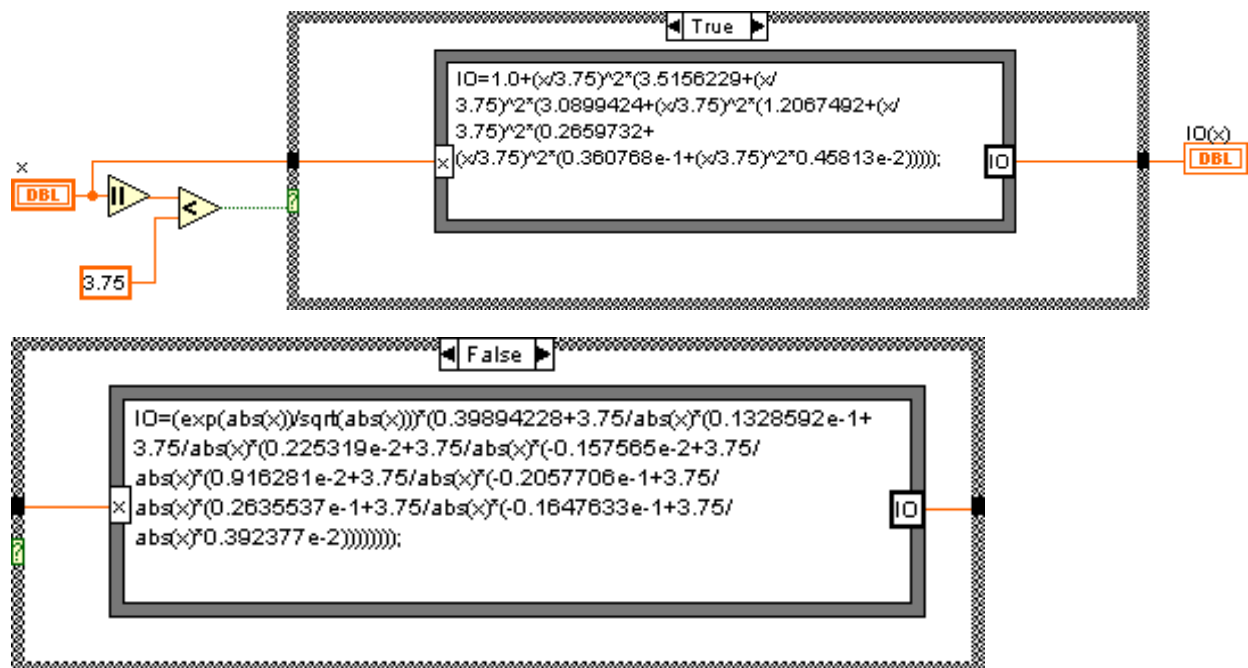
A função de Bessel modificada de ordem zero, Abramowitz e Stegun, 1964, utilizada na distribuição de Rayleigh bivariada, Eq. (3-24).



### CONTROLOS E INDICADORES

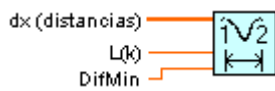
- DBL IO(x) Resultado da função de Bessel.
- DBL x Argumento da função de Bessel.

### CÓDIGO LABVIEW



## INCOMPATIBILIDADE SONDAS.VI

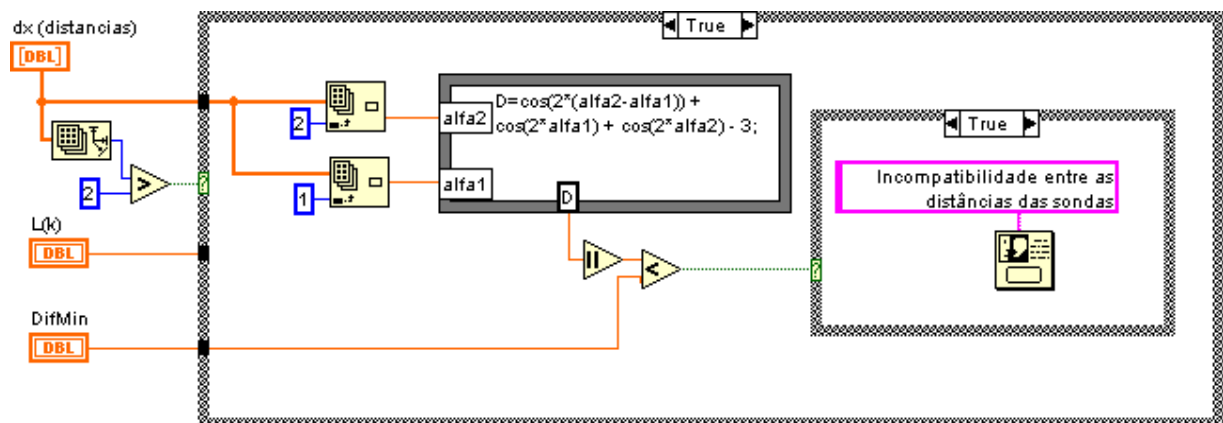
Rotina de verificação da compatibilidade das distâncias entre sondas, de acordo com Goda, 1985. Quanto maior o valor de DifMin, mais perto das condições ideais se está.



### CONTROLOS E INDICADORES

- [DBL]** **DifMin** Diferença mínima nas inequações de compatibilidade entre sondas. Por omissão, DifMin = 0.01;
- [DBL]** **dx (distancias)** Distâncias (em m) entre as diversas sondas: x12 - entre a sonda 1 e a sonda 2; x13 - entre a sonda 1 e a sonda 3; x14 - entre a sonda 1 e a sonda 4; [ ... ] etc.
- [DBL]** **L(k)** Comprimento de onda da harmónica k.

### CÓDIGO LABVIEW

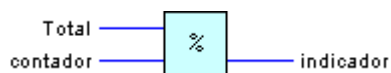






## INDICADOR %.VI

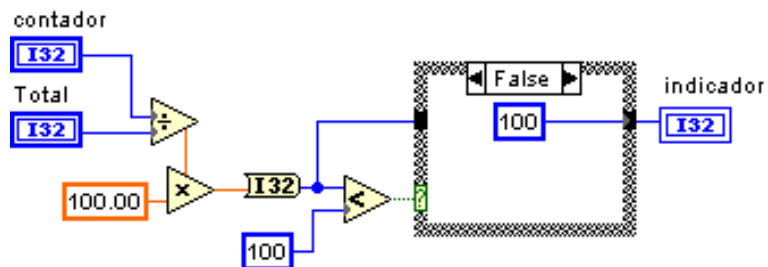
Indicador gráfico da parte concluída de uma qualquer rotina, em %.



### CONTROLOS E INDICADORES

- I32** contador Contador característico da rotina.
- I32** indicador Indicador da parte concluída.
- I32** Total Máximo valor que o contador pode tomar.

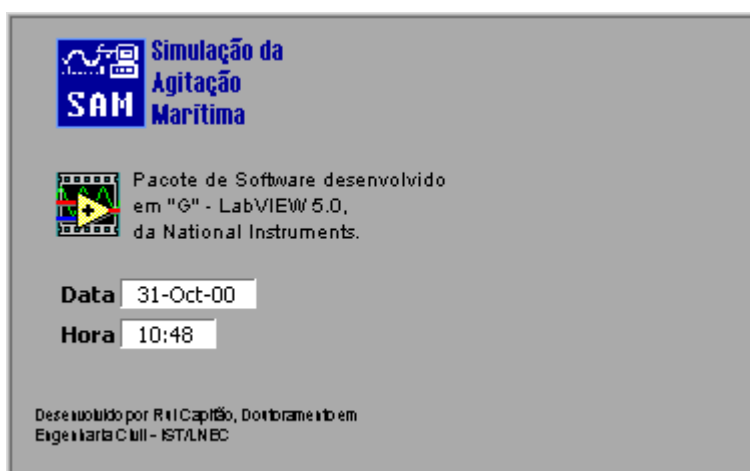
### CÓDIGO LABVIEW



## INFO.VI

Painel de informação geral do pacote SAM.

### PAINEL PRINCIPAL

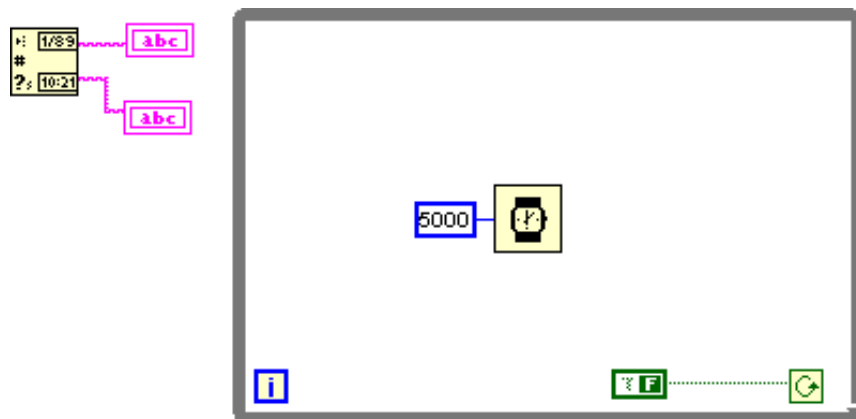


### CONTROLOS E INDICADORES

Data Data actual.

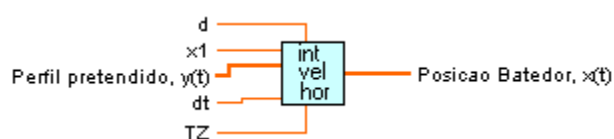
Hora Hora actual.

### CÓDIGO LABVIEW



## INTEGRAÇÃO VELOCIDADE HORIZONTAL.VI

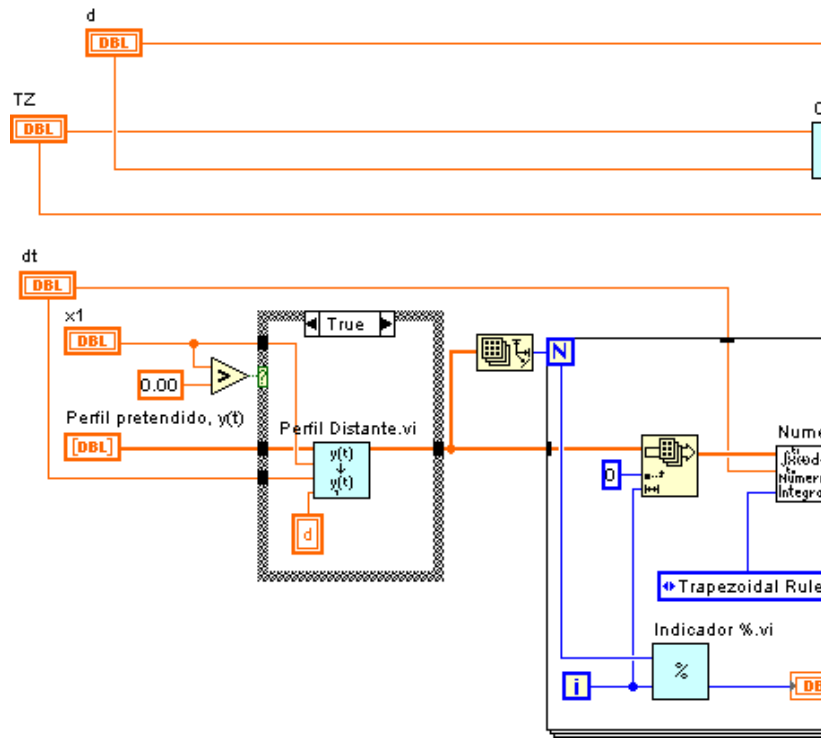
Método de obtenção na água de um sinal com um perfil da superfície da água pré-especificado, utilizando o método da integração da velocidade horizontal, tal como é descrito em 5.7.1.



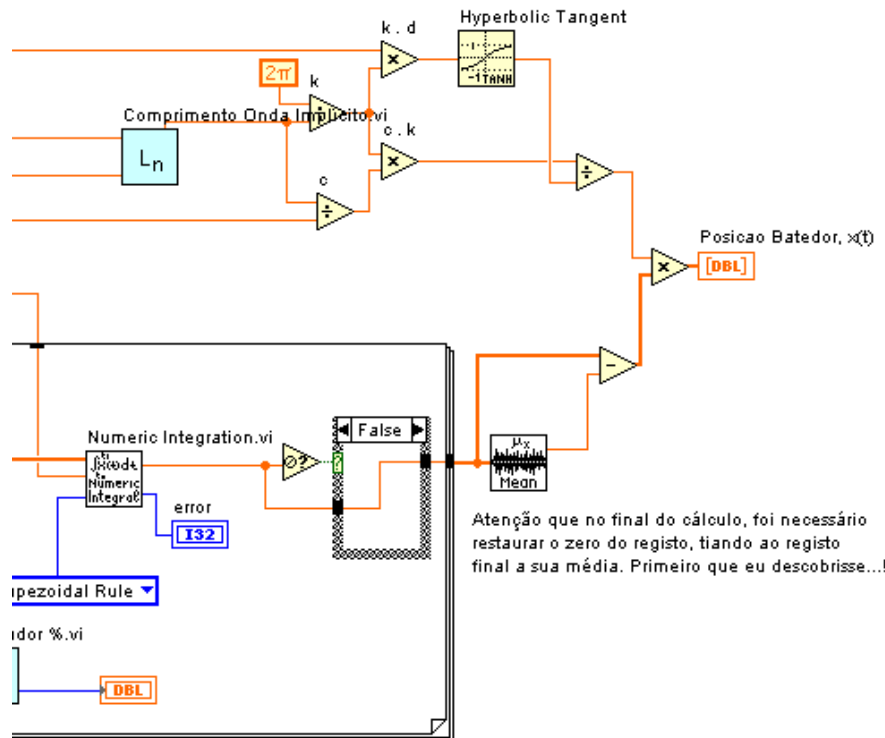
### CONTROLOS E INDICADORES

- [DBL]** **d** Profundidade do canal, em metros.
- [DBL]** **dt** Intervalo de digitalização.
- [DBL]** **Perfil pretendido,  $y(t)$**  Perfil pretendido no canal ou tanque
- [DBL]** **Posição Batedor,  $x(t)$**  Sinal no batedor modificado de acordo com o método e a distância considerados
- [DBL]** **TZ** Período médio de zero ascendente, em segundos
- [DBL]**  **$x1$**  Distância do batedor de ondas ao ponto onde se pretende obter o dado perfil da superfície da água, em metros. No caso de  $x1=0$ , impossível na prática, o Cálculo é mais rápido. Se  $x1>0$ , tem que se calcular adequadas modificações nas fases de cada harmónica.

## CÓDIGO LABVIEW



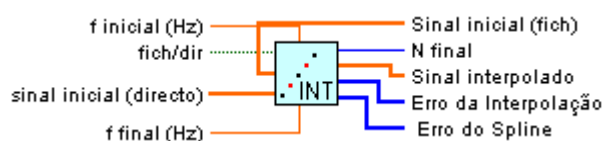
(→)



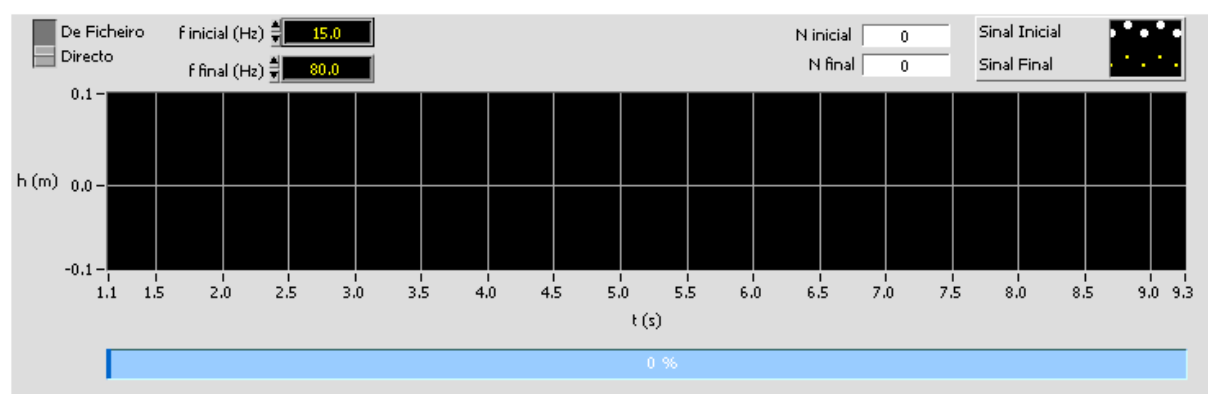
(←)

## INTERPOLAÇÃO DE VALORES.VI

Rotina que permite interpolar valores de um sinal que se pretende que contenha uma maior frequência de digitalização.



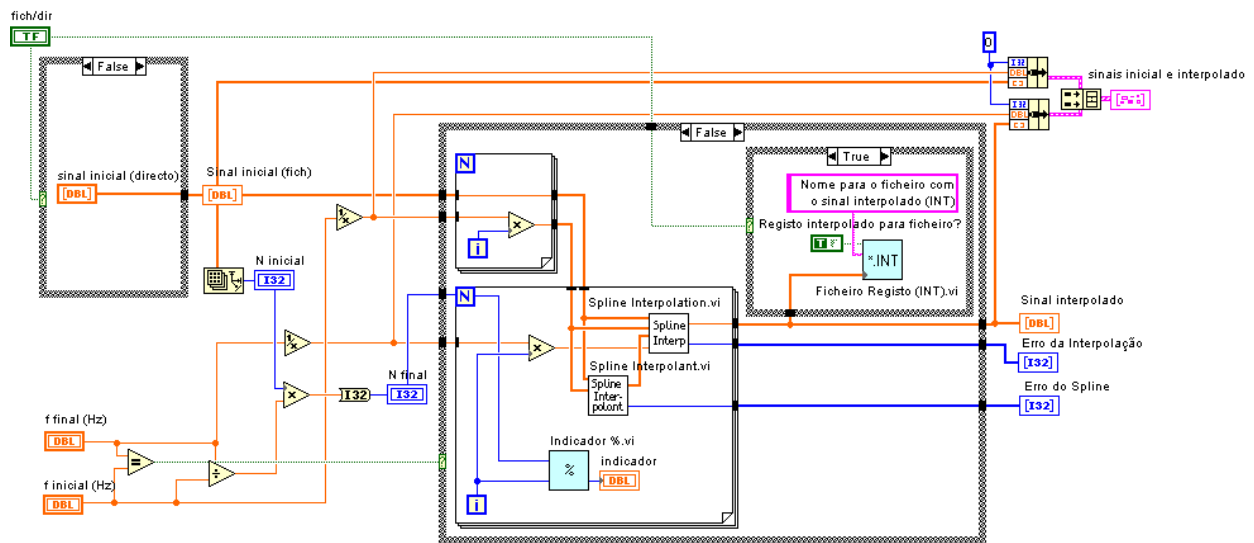
### PAINEL PRINCIPAL



### CONTROLOS E INDICADORES

- DBL **f final (Hz)** Frequência que se pretende obter no sinal.
- DBL **f inicial (Hz)** Frequência inicial de digitalização, inverso do intervalo entre observações ( $= 1/dt$ ), em Hertz.
- I32 **N final** Nº de pontos do registo interpolado.
- I32 **N inicial** Nº de pontos do registo inicial.

## CÓDIGO LABVIEW



## LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)

- \*.INT Ficheiro Registo (INT).vi  
 C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ficheiro Registo (INT).vi
  
- % Indicador %.vi  
 C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Indicador %.vi
  
- 12.3  
TXT Ler Folha Cálculo.vi  
 C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ler Folha Cálculo.vi
  
- Spline  
Interpolant Spline Interpolant.vi  
 C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\Analysis\5stat.11b\Spline Interpolant.vi
  
- Spline  
Interp Spline Interpolation.vi  
 C:\Program Files\LabVIEW\vi.lib\Analysis\5stat.11b\Spline Interpolation.vi

## INTERPOLAÇÃO.VI

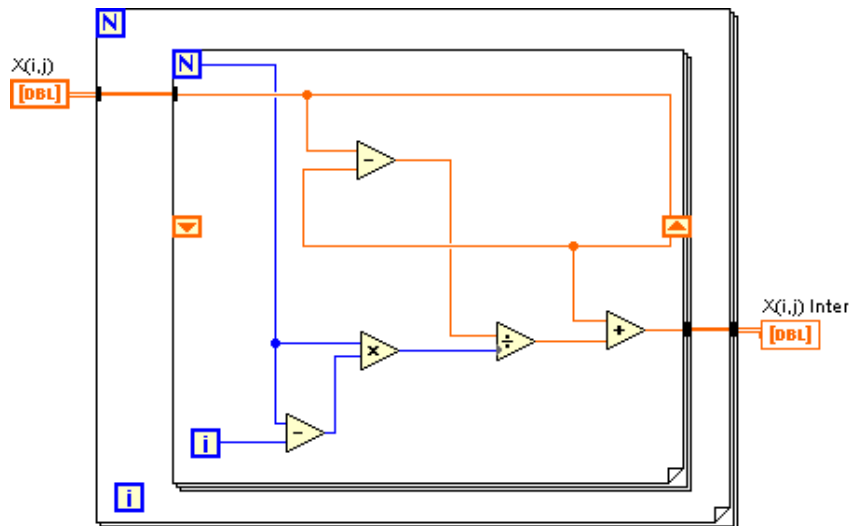
Nesta rotina, separa-se em M ficheiros o ficheiro conjunto \*\_s.nd e interpola-se linearmente os valores de M-1 ficheiros para obter valores simultâneos nos M ficheiros, que tomarão os nomes \*\_1.s.nd, \*\_2.s.nd, ..., \*\_M.s.nd, de acordo com o exposto em 5.5.9.



### CONTROLOS E INDICADORES

- [DBL]**  $X(i,j)$  Conjunto de registos, nas M sondas, obtidos em instantes não simultâneos.
- [DBL]**  $X(i,j)$  **Inter** Conjunto de registos, nas M sondas, obtidos simultaneamente.

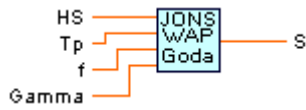
### CÓDIGO LABVIEW





## JONSWAP-GODA.VI

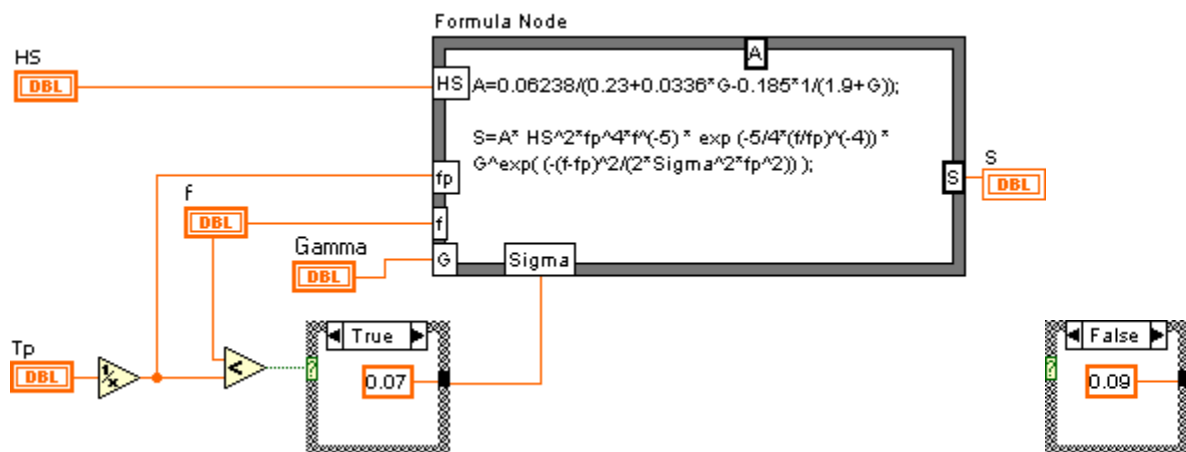
Rotina que calcula o espectro de JONSWAP-Goda, Eq. (A-20) do Anexo 2 - Definição de Espectros Empíricos.



### CONTROLOS E INDICADORES

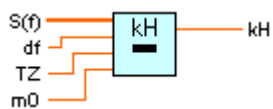
- DBL** f Frequência
- DBL** Gamma Parâmetro de esbelteza  $\gamma$ .
- DBL** HS Altura significativa
- DBL** S Ordenada do espectro correspondente à frequência f.
- DBL** Tp Período de pico do espectro

### CÓDIGO LABVIEW



## KH BATTJES.VI

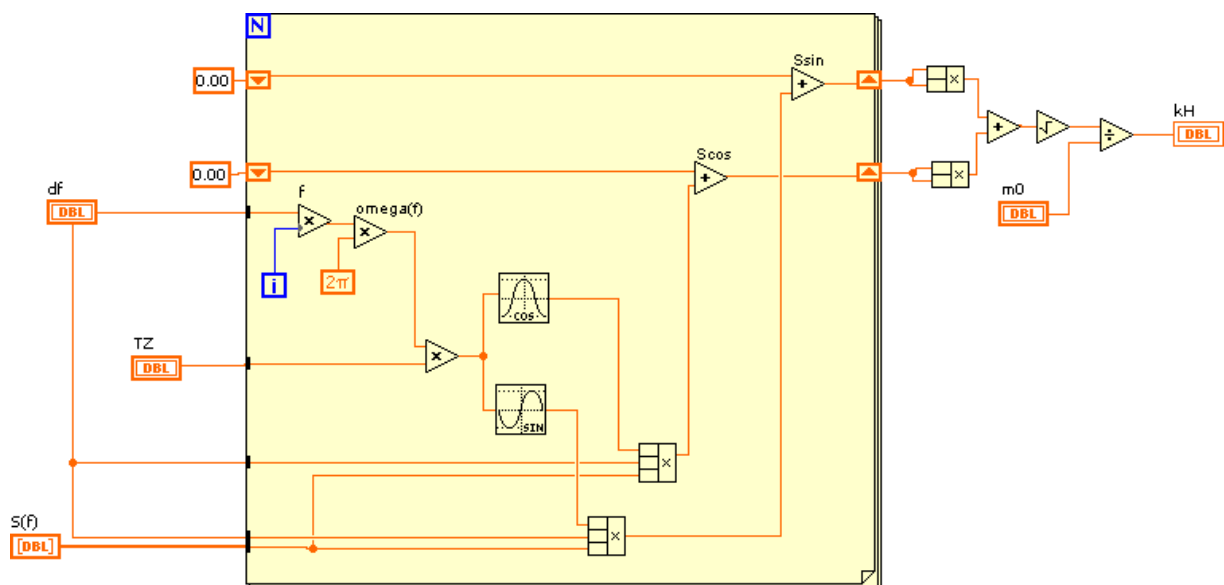
Cálculo do parâmetro de correlação,  $\kappa$  ou  $kH$  (não confundir com o coeficiente de correlação entre alturas de onda sucessivas  $rH$ ), de acordo com a perspectiva espectral de Battjes e Vledder, Eq. (3-26).



### CONTROLOS E INDICADORES

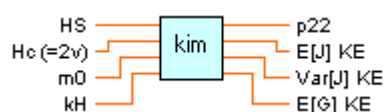
- [DBL]** df Intervalo entre frequências
- [DBL]** kH Parâmetro de correlação espectral
- [DBL]** m0 Momento de ordem zero do espectro
- [DBL]** S(f) Espectro em frequência
- [DBL]** TZ Período médio

### CÓDIGO LABVIEW



## KIMURA ESPECTRAL.VI

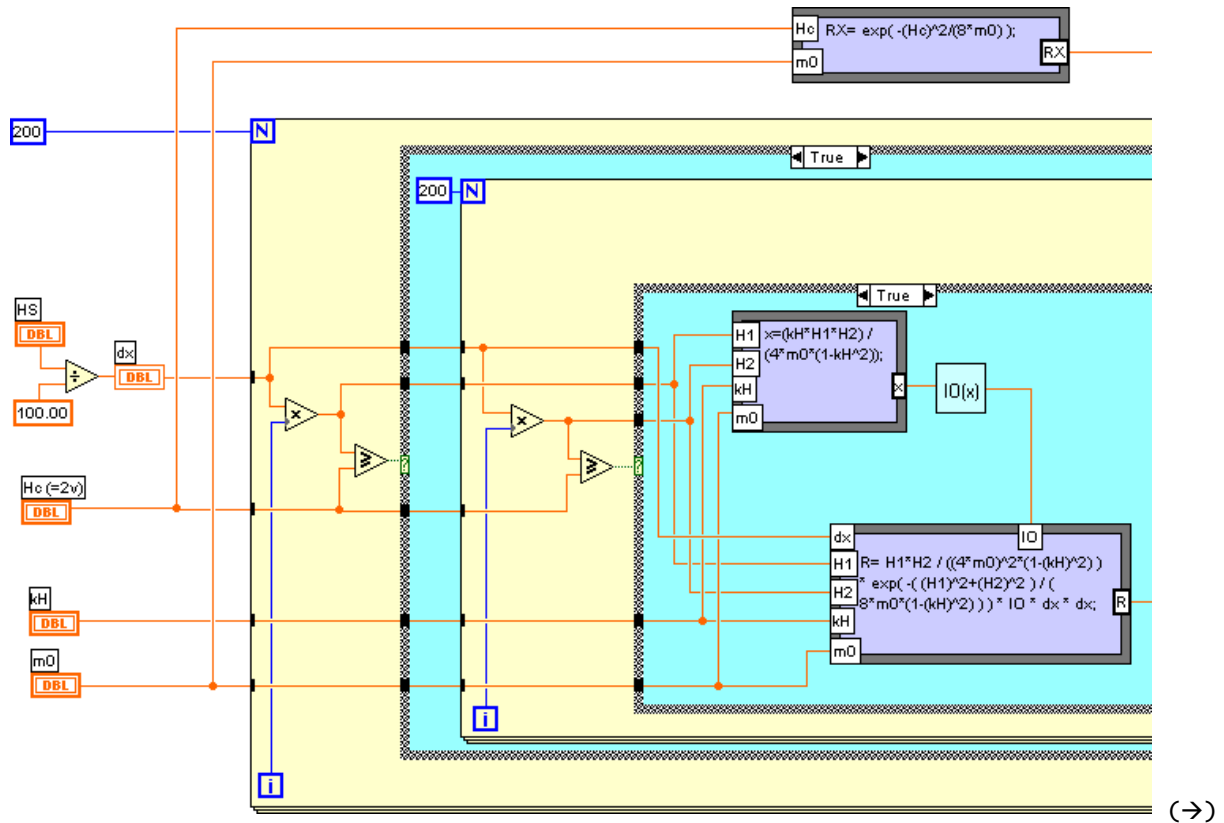
Cálculo de parâmetros de grupos de ondas através da teoria de Kimura, 1980, e do refinamento espectral de Battjes, de acordo, respectivamente, com o exposto em 3.3.2 e 3.3.3.



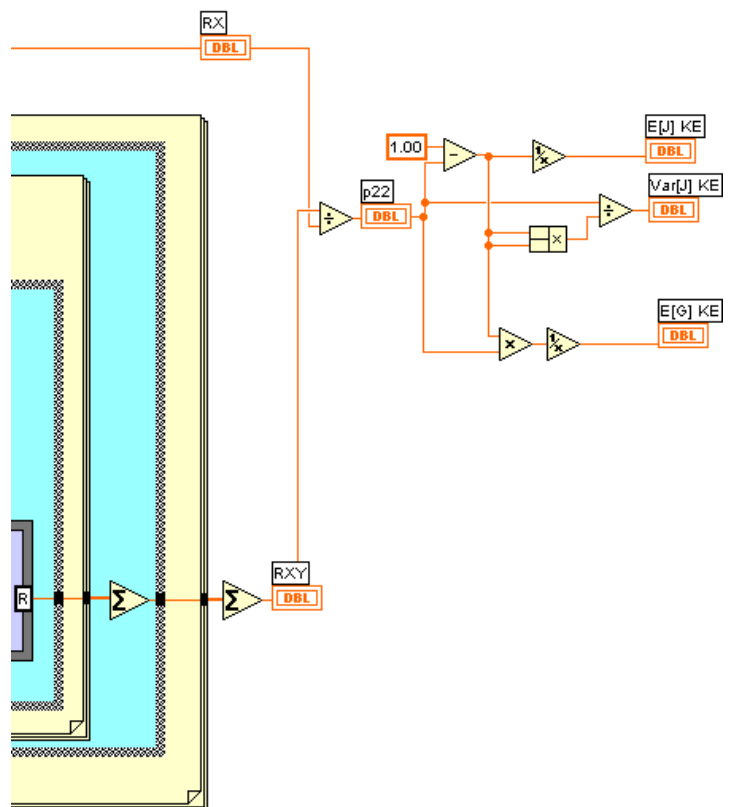
### CONTROLOS E INDICADORES

- DBL** E[G] KE Número médio de ondas entre grupos de ondas utilizando o método de Kimura Espectral, Kimura, 1980, Battjes e Vledder, 1984.
- DBL** E[J] KE Número médio de ondas nos grupos de ondas utilizando o método de Kimura Espectral, Kimura, 1980, Battjes e Vledder, 1984.
- DBL** Hc (=2v) Altura de onda de grupo de ondas, que corresponde a um nível v a partir do qual se considera haver grupos de ondas, em metros.
- DBL** HS Altura significativa calculada do espectro através da fórmula  $4 \cdot \sqrt{m0}$ , em metros.
- DBL** kH Parâmetro de correlação espectral, parâmetro adimensional devido a Battjes, 1974, e Battjes e Vledder, 1984, que mede a largura do espectro. Este parâmetro é importante no cálculo de p22 da teoria de Kimura Espectral, 1980, e está relacionado com o coeficiente de correlação entre ondas sucessivas, rH.
- DBL** m0 Momento de ordem zero de um dado espectro, cujo valor é igual à área desse espectro.
- DBL** p22 Probabilidade
- DBL** Var[J] KE Variância de E[J] KE utilizando o método de Kimura Espectral, Kimura, 1980, Battjes e Vledder, 1984.

CÓDIGO LABVIEW

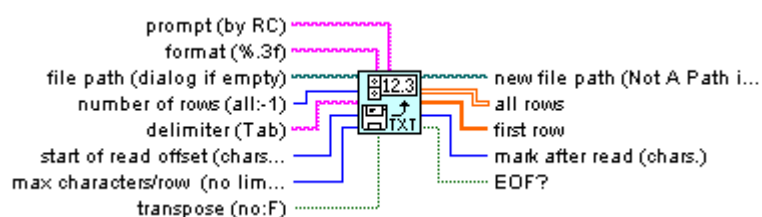


(←)











## LER FOLHA CÁLCULO.VI, LER LINHAS DE UM FICHEIRO.VI

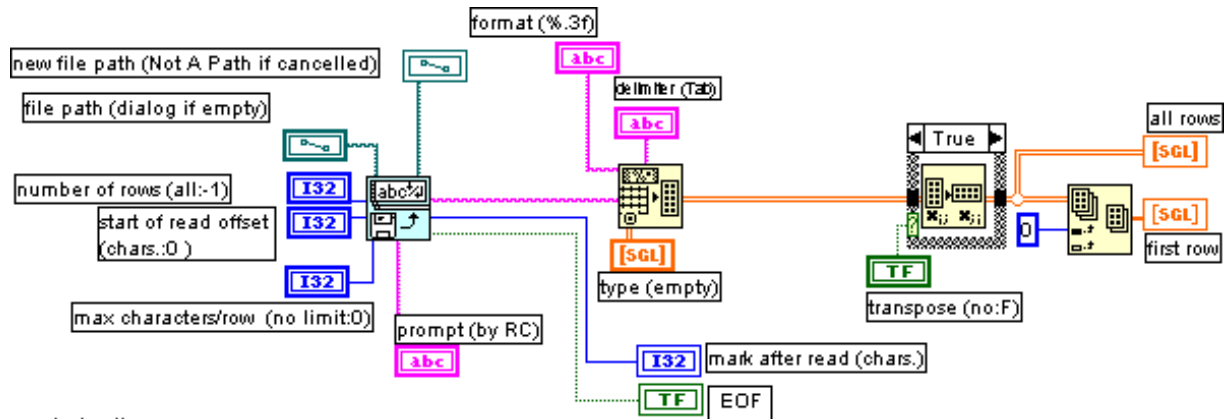
Modificações do VI interno LabVIEW “Read SpreadSheet.vi” por forma a receber mensagens em Português. Estes VI’s permitem a leitura de linhas ou colunas de um ficheiro ASCII e a sua conversão para vectores uni ou bidimensionais reais.



### CONTROLOS E INDICADORES

-  **all rows** Todas as linhas (vector bidimensional).
-  **delimiter (Tab)** Delimitador de caracteres.
-  **file path (dialog if empty)** Caminho do ficheiro de leitura.
-  **first row** Primeira linha (vector unidimensional).
-  **format (%.3f)** Formato de leitura.
-  **new file path (Not A Path if cancelled)** Novo nome do ficheiro (se necessário).
-  **prompt (by RC)** Texto da janela de diálogo.
-  **transpose (no:F)** Selector que permite a inversão das matrizes após leitura.

## CÓDIGO LABVIEW (TÍPICO)



### instructions

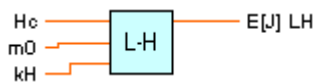
Spreadsheet String to Array requires that columns are separated with the input delimiter string (Tab default), and rows are terminated with EOL characters. If your spreadsheet string uses a different terminator, use the Search String and Replace VI from the examples/general/strings.lib library (or something equivalent) at the output of Read Lines From File to modify the string.

Spreadsheet String to Array produces a rectangular numeric array, whose number of columns equals the maximum number of columns in all rows that are read. Short rows are padded with zeroes.

You can modify a copy of this VI to return the file contents into arrays of strings by changing all rows, first row, and type (empty) arrays to string arrays and by setting the format to %s.

## LONGUET-HIGGINS.VI

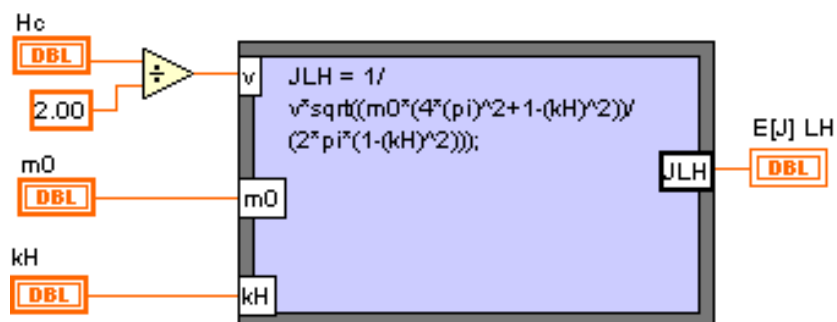
Fórmulas de Longuet-Higgins, 1984, para o cálculo de E[J], Eq. (3-33). Varia com o nível considerado.



### CONTROLOS E INDICADORES

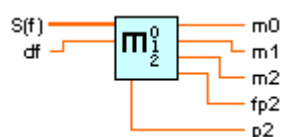
- DBL** E[J] LH Valor de E[J], obtido pela fórmula de Longuet-Higgins, 1984. Varia com o nível v (ou Hc) considerado.
- DBL** Hc Altura de onda de grupo de ondas, que corresponde a um nível v a partir do qual se considera haver grupos de ondas, em metros.
- DBL** kH Parâmetro de correlação espectral, parâmetro adimensional devido a Battjes, 1974, e Battjes e Vledder, 1984, que mede a largura do espectro. Este parâmetro é importante no cálculo de p22 da teoria de Kimura Espectral, 1980, e está relacionado com o coeficiente de correlação entre ondas sucessivas, rH.
- DBL** m0 Momento de ordem zero de um dado espectro, cujo valor é igual à área desse espectro.

### CÓDIGO LABVIEW



## MOMENTOS.VI

Cálculo dos momentos de ordem 0, 1 e 2 do espectro  $S(f)$ , Eq. (2-12), definido em intervalos distanciados de  $df$ .  $fp2$  e  $p2$  são somatórios parciais, auxiliares, necessários para o cálculo de parâmetros de agrupamento de ondas.

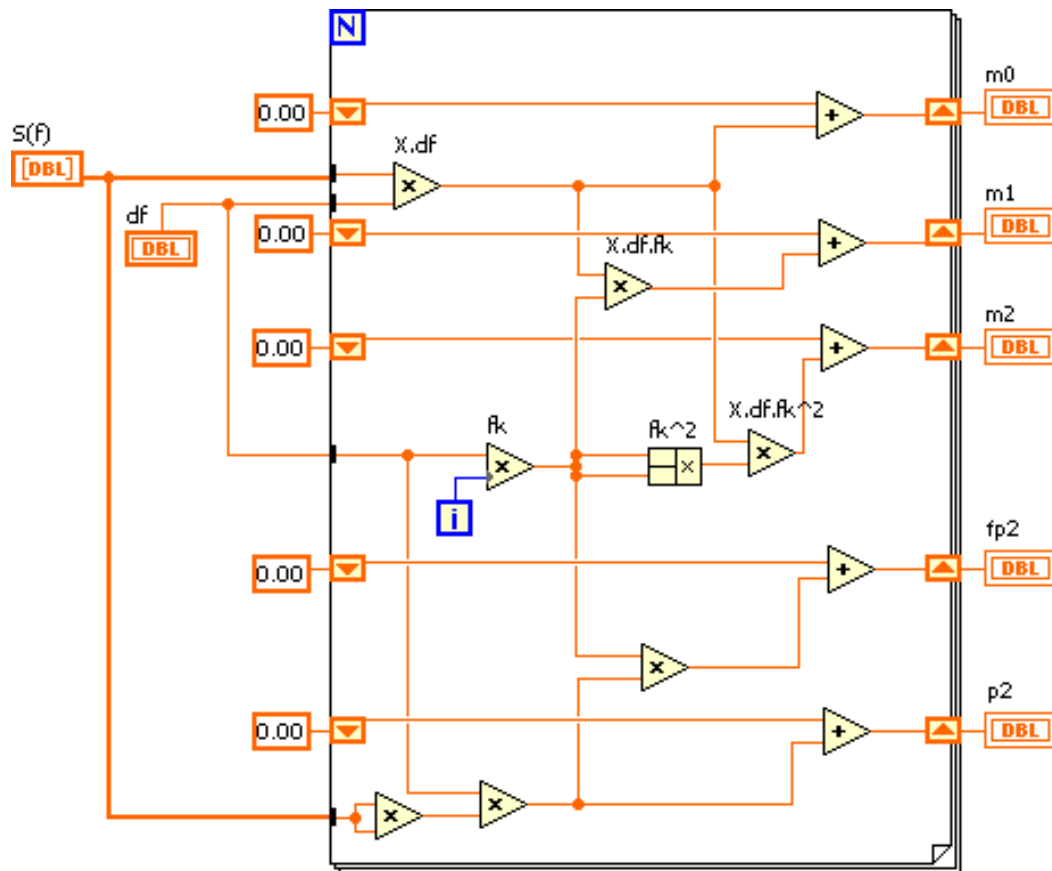


### CONTROLOS E INDICADORES

- DBL** **df** Intervalo entre frequências das ordenadas do espectro.
- DBL** **fp2** Somatório auxiliar.
- DBL** **m0** Momento de ordem zero do espectro, cujo valor é igual à área desse espectro.
- DBL** **m1** Momento de 1ª ordem do espectro.
- DBL** **m2** Momento de 2ª ordem do espectro.
- DBL** **p2** Somatório auxiliar.
- DBL** **S(f)** Espectro de variância.

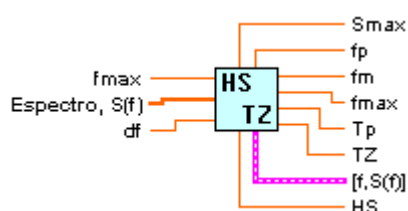


## CÓDIGO LABVIEW













## PARÂMETROS ESPECTRAIS.VI

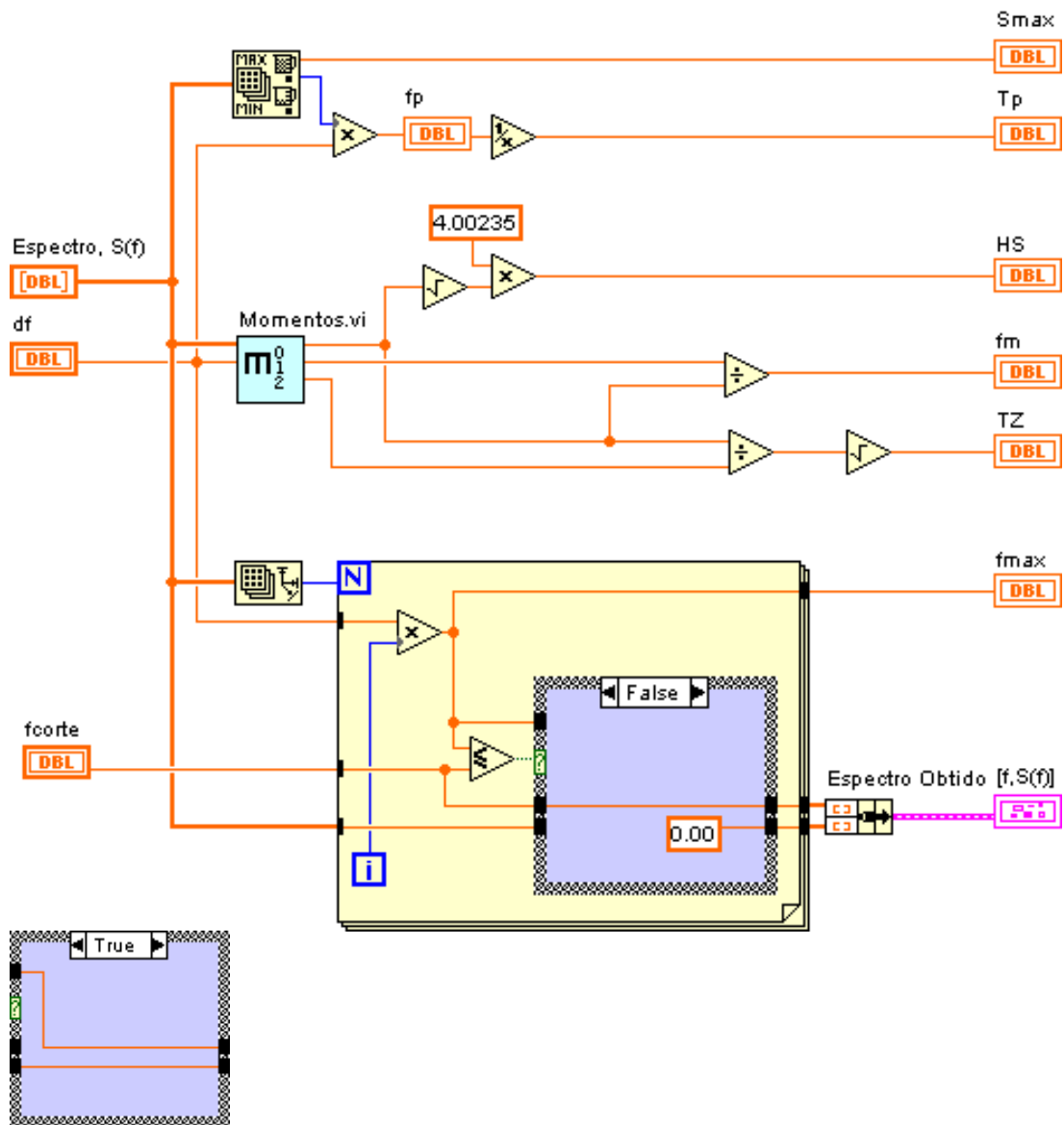
Cálculo dos mais usuais parâmetros calculados com base no espectro de variância, tais como a altura significativa (HS), Eq. (2-13), o período médio de zero ascendente (TZ), Eq. (2-15), o período de pico de espectro ( $T_p$ ), os correspondentes valores da frequência de pico ( $f_p$ ) e da ordenada do espectro ( $S_{max}$ ), etc.



### CONTROLOS E INDICADORES

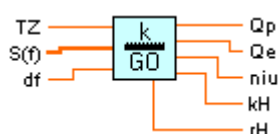
-  **[f,S(f)]** Representação gráfica do espectro, sendo as abcissas frequências (em Hz) e as ordenadas densidades (em  $m^2.s$ ).
-  **df** Intervalo entre frequências.
-  **Espectro, S(f)** Ordenadas do espectro.
-  **fm** Frequência mediana calculada através do espectro obtido, em Hz.
-  **fmax** Frequência máxima que o sinal poderá exibir, frequência de Nyquist.
-  **fp** Frequência de pico do espectro obtido, a frequência que corresponde à máxima ordenada do espectro, em Hz.
-  **HS** Altura significativa calculada do espectro obtido através da fórmula  $4*\sqrt{m_0}$ , em metros.
-  **Smax** Máxima ordenada do espectro obtido, em  $m^2/Hz$ .
-  **Tp** Período do pico do espectro obtido, em segundos.
-  **TZ** Período médio de zero ascendente calculado através do espectro obtido, em segundos.

## CÓDIGO LABVIEW



## PARÂMETROS GO.VI

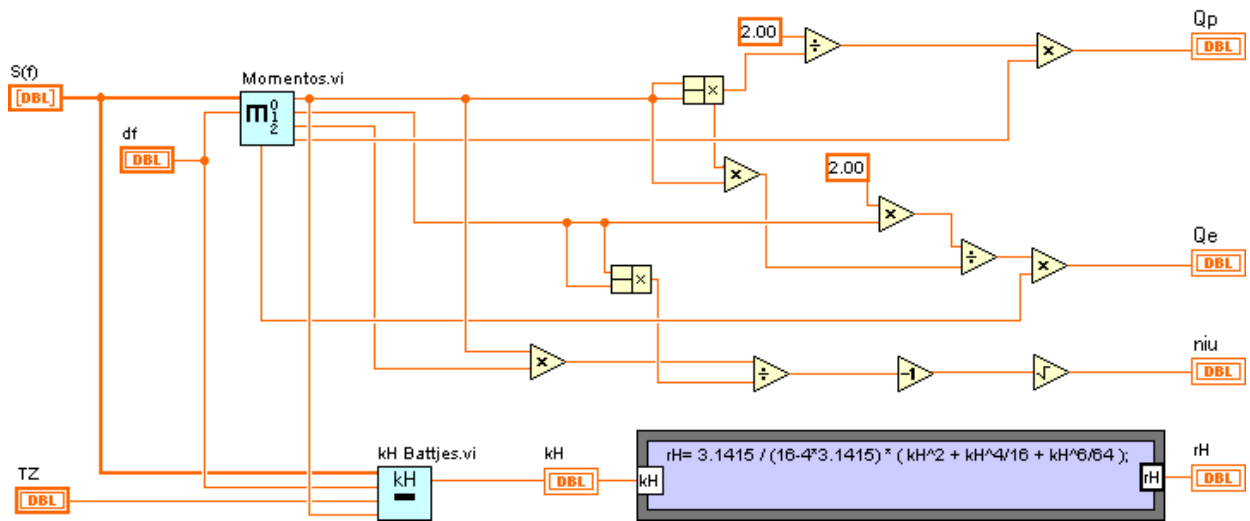
Cálculo dos parâmetros espectrais mais usuais na caracterização do agrupamento de ondas por via espectral. O ponto de vista de que o espectro determina o agrupamento de ondas é aqui plenamente justificado.



### CONTROLOS E INDICADORES

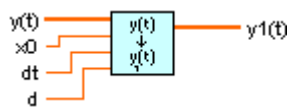
- DBL** **v, niu** Parâmetro adimensional de Longuet-Higgins, 1984, que mede a largura espectral. Quanto menor o valor de  $v$ , mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamento de ondas existe.
- DBL** **df** Intervalo entre frequências das ordenadas do espectro.
- DBL** **kH** Parâmetro de correlação espectral, parâmetro adimensional devido a Battjes, 1974, e Battjes e Vledder, 1984, que mede a largura do espectro. Este parâmetro é importante no cálculo de  $p_{22}$  da teoria de Kimura Espectral, 1980, e está relacionado com o coeficiente de correlação entre ondas sucessivas,  $rH$ .
- DBL** **Qe** Parâmetro espectral de Medina e Hudspeth, 1987, baseado em  $Qp$ , de Goda, 1970, o qual dá uma medida da largura espectral. Quanto maior o valor de  $Qe$ , mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamento de ondas existe.
- DBL** **Qp** Parâmetro espectral de Goda, 1970, que dá uma medida da largura espectral. Quanto maior o valor de  $Qp$ , mais esbelto é o espectro e, em média, mais agrupamentos de ondas existem.
- DBL** **rH** Aproximação do coeficiente de correlação entre ondas sucessivas, devida a Battjes, 1974, unicamente através do uso de informação espectral.
- DBL** **S(f)** Espectro em frequência
- DBL** **TZ** Período médio de zero ascendente, em segundos.

## CÓDIGO LABVIEW



## PERFIL DISTANTE.VI

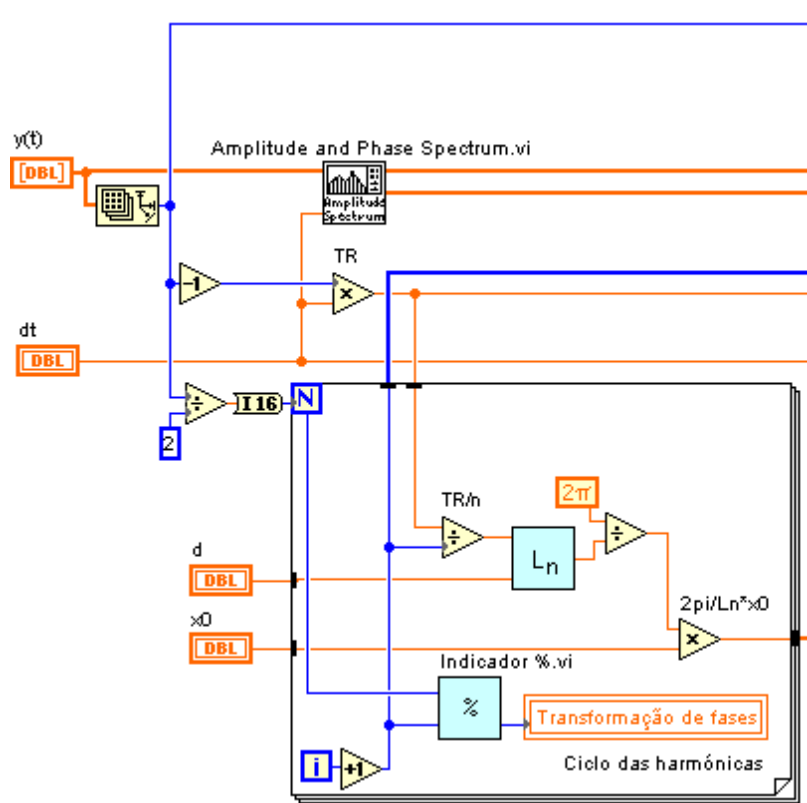
Obtenção de um perfil a certa distância,  $x_0$ , do batedor, utilizando o método da integração da velocidade horizontal, exposto em . Para se obter o perfil  $\eta(t)$  a uma distância  $x_0$  do batedor, há que calcular o perfil  $\eta_1(t)$  a gerar junto ao batedor, de modo que se produza  $\eta(t)$  à distância desejada. Usa-se assim a Eq. (5-111), com  $\eta_1(t)$  calculado da Eq. (5-119).



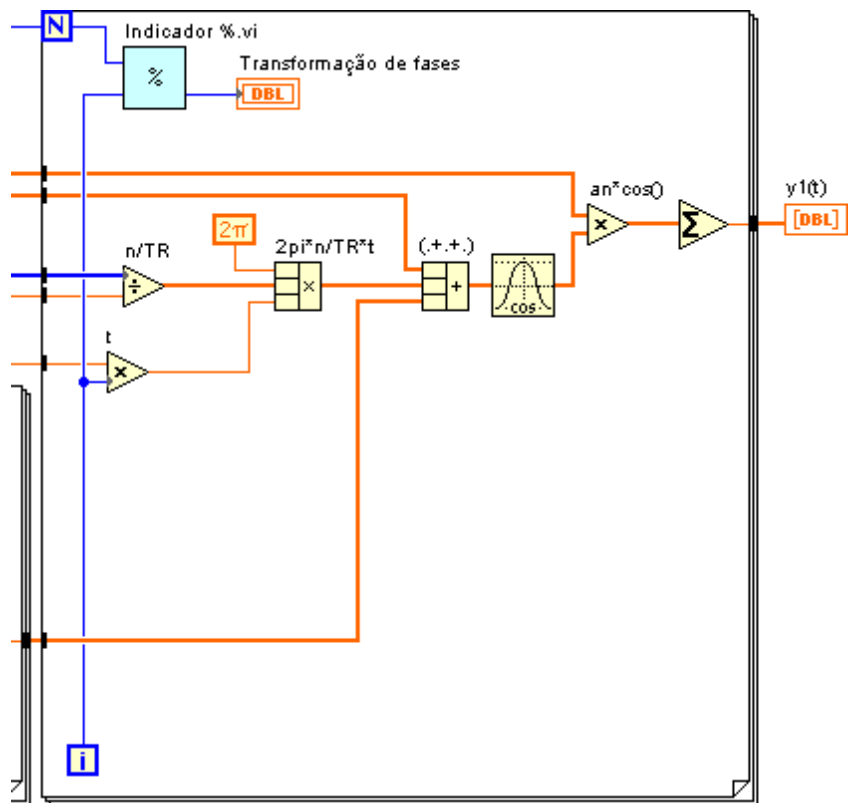
### CONTROLOS E INDICADORES

- [DBL]** **d** Profundidade da água no canal, em metros.  
OBS: Notar que este parâmetro só é necessário quando se pretende, para além da simulação numérica, a geração física.
- [DBL]** **dt** Intervalo de digitalização, ou intervalo de tempo entre observações, inverso de  $f_d$ , em s.
- [DBL]**  **$x_0$**  Distância do batedor de ondas ao ponto onde se pretende obter o dado perfil da superfície da água, em metros. No caso de  $x_0=0$ , impossível na prática, o cálculo é mais rápido. Se  $x_0>0$ , tem que se calcular adequadas modificações nas fases de cada harmónica.
- [DBL]**  **$y(t)$**  Perfil pretendido no canal ou tanque.
- [DBL]**  **$y_1(t)$**  Perfil no batedor de acordo com o método e a distância  $x_0$ .

CÓDIGO LABVIEW



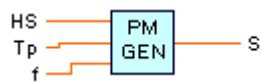
(→)







(←)

## PM-GEN.VI

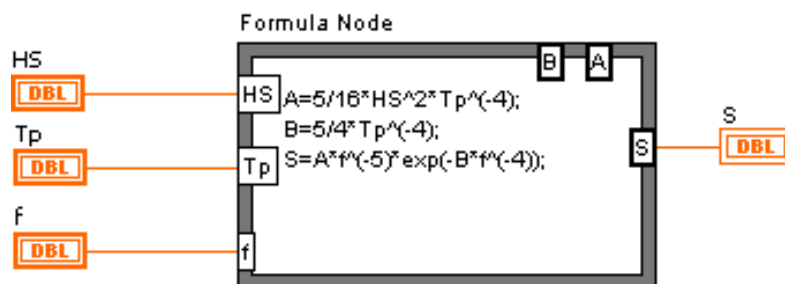
Rotina que calcula o espectro de Pierson-Moskowitz generalizado, Eq. (A-19) do Anexo 2 - Definição de Espectros Empíricos.



### CONTROLOS E INDICADORES

-  f Frequência
-  HS Altura significativa
-  S Ordenada do espectro
-  Tp Período de pico do espectro

### CÓDIGO LABVIEW








## PM-ITTC.VI

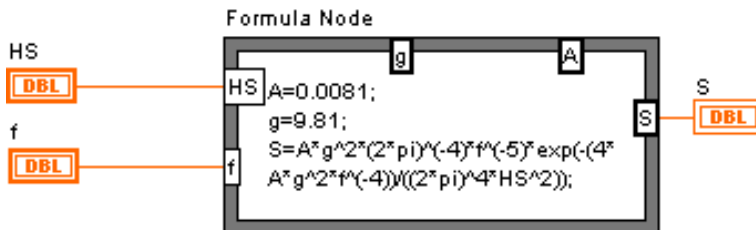
Rotina que calcula o espectro de Pierson-Moskowitz versão ITTC, Eq. (A-18) do Anexo 2 - Definição de Espectros Empíricos.



### CONTROLOS E INDICADORES

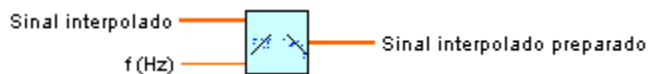
-  f Frequência
-  HS Altura significativa
-  S Ordenada do espectro

### CÓDIGO LABVIEW



## PREPARAR SINAL.VI

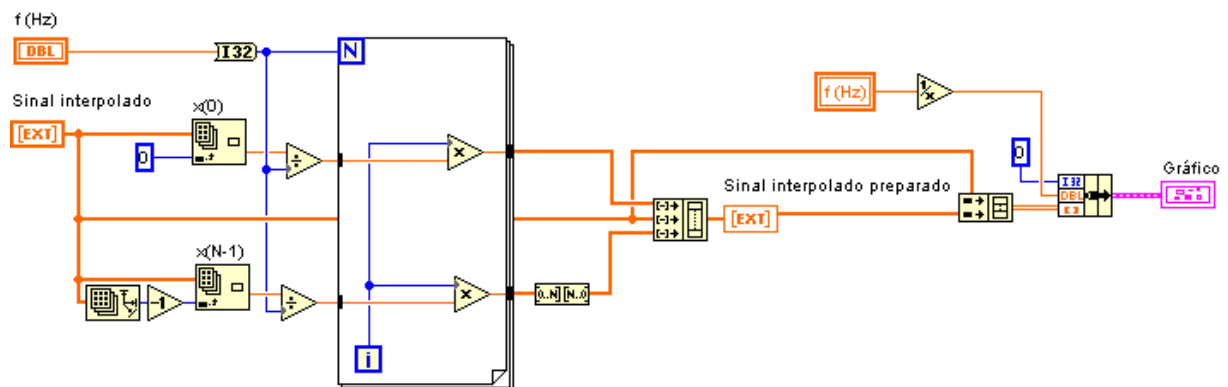
Rotina que permite evitar mudanças bruscas no comando do batedor através da implementação de um alisamento das extremidades do sinal.



### CONTROLOS E INDICADORES

- [DBL]** **f (Hz)** Duração total do registo, em segundos.
- [EXT]** **Sinal interpolado preparado** Sinal interpolado, “aparado” nas extremidades para evitar mudanças bruscas no comando do batedor.
- [EXT]** **Sinal interpolado** Sinal obtido após interpolação de valores.

### CÓDIGO LABVIEW



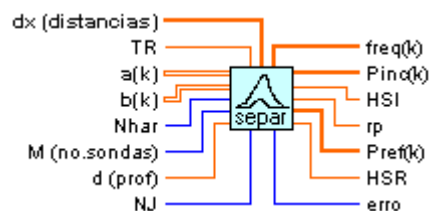
## SEPARAÇÃO.VI

Rotina de separação dos espectros incidente e reflectido dos métodos das 2 e das M sondas, de acordo com o exposto em 5.5.10.

Assim, com as constantes  $a(k)$  e  $b(k)$ , calculadas na análise harmónica, e os períodos harmónicos, constrói-se, para cada sinusóide  $k$  (das  $N_{har}$  harmónicas):

- i) um sistema de equações determinado no caso de 2 sondas ( $M=2$ ); ou
- ii) um sistema de equações indeterminado no caso de mais de 2 sondas ( $M>2$ ).

Resolvido o sistema, resultam os valores  $XI$ ,  $YI$ ,  $XR$  e  $YR$ , exactos ou aproximados pelos mínimos quadrados. Deste modo, para cada  $k$ , obtêm-se  $Ir(k)$ ,  $Rr(k)$ ,  $teta(k)$  e  $Phi(k)$ , assim como os espectros incidente e reflectido,  $Si(k)$  e  $Sr(k)$  e respectivos coeficientes de reflexão,  $Cr(k)$ .



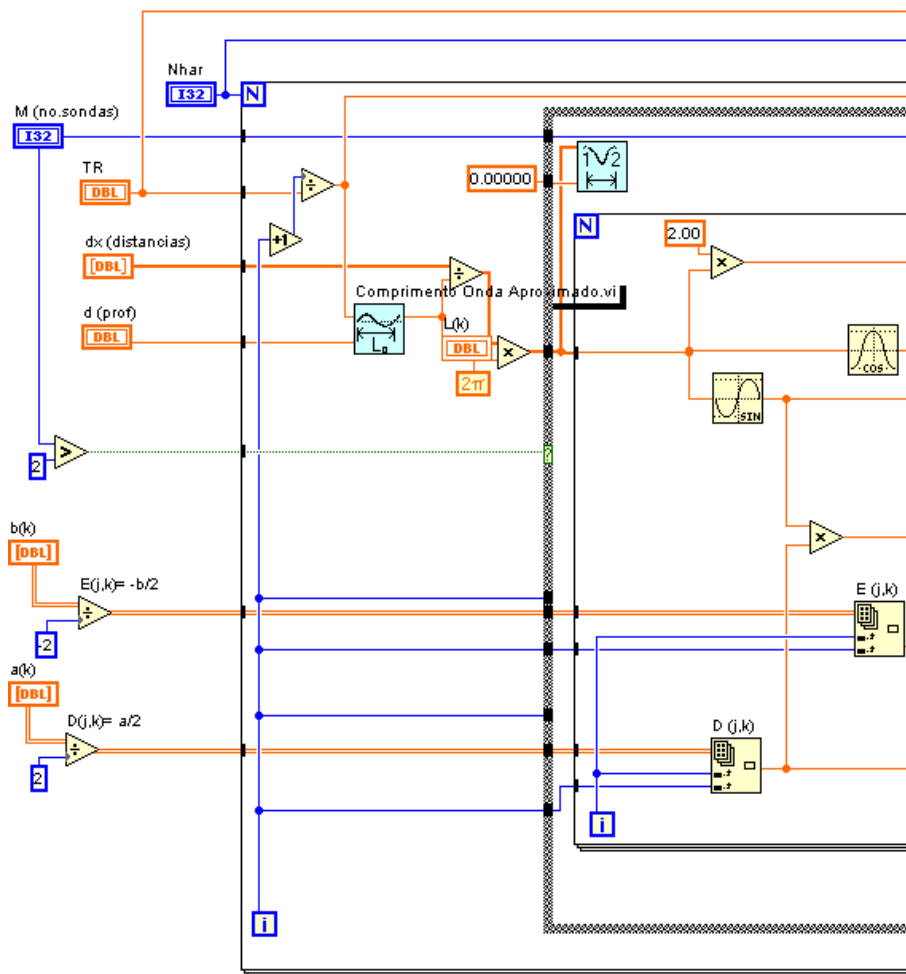
### CONTROLOS E INDICADORES

- [DBL]** **a(k)** Coeficiente de Fourier correspondente à harmónica  $k$ .
- [DBL]** **b(k)** Coeficiente de Fourier correspondente à harmónica  $k$ .
- [DBL]** **d (prof)** Profundidade da água no canal, em metros.  
OBS: Este parâmetro só é importante quando se pretende, para além da simulação numérica, a geração física.
- [DBL]** **dx (distancias)** Distâncias (em m) entre as diversas sondas:  $x_{12}$  - entre a sonda 1 e a sonda 2;  $x_{13}$  - entre a sonda 1 e a sonda 3;  $x_{14}$  - entre a sonda 1 e a sonda 4; [ ... ] etc.
- [I32]** **Erro** Erro do método.
- [DBL]** **freq(k)** Frequência.
- [DBL]** **HSI** Altura significativa incidente calculada através da energia do espectro incidente ( $m_{OI}$ ), após alisamento com janela de Bartlett.
- [DBL]** **HSR** Altura significativa reflectida calculada através da energia do espectro reflectido ( $m_{OR}$ ), após alisamento com janela de Bartlett.
- [I32]** **M (no. sondas)** Nº de sondas
- [I32]** **Nhar** Nº de sinusóides de definição do espectro. Nº de harmónicas utilizadas

na análise harmónica dos sinais das sondas.

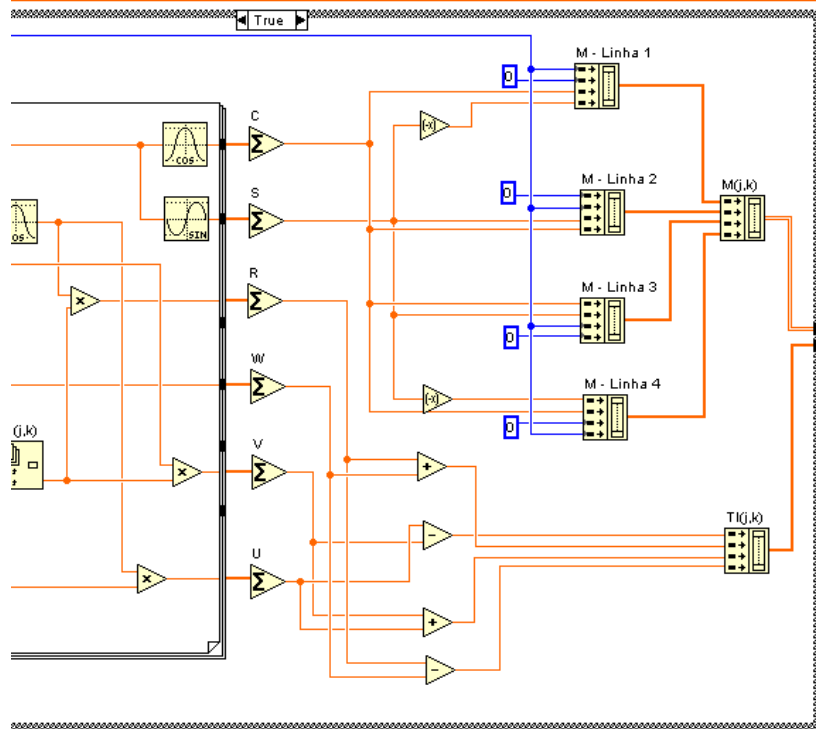
- I32** NJ N° de pontos da semi-janela de Bartlett (triangular) considerada no alisamento de um dado espectro. O espectro alisado é calculado através de uma média móvel de  $2*NJ+1$  pontos, ponderada triangularmente, e centrada no ponto de cálculo.
- DBL** Si(k) Ordenada correspondente à harmónica k do espectro incidente reconstituído.
- DBL** Sr(k) Ordenada correspondente à harmónica k do espectro reflectido reconstituído.
- DBL** rp Coeficiente de reflexão global calculado a partir dos picos dos espectros incidente e reflectido [Si(fp) e Sr(fp)], após alisamento com janela de Bartlett.
- DBL** TR Duração total dos sinais, em segundos.

## CÓDIGO LABVIEW



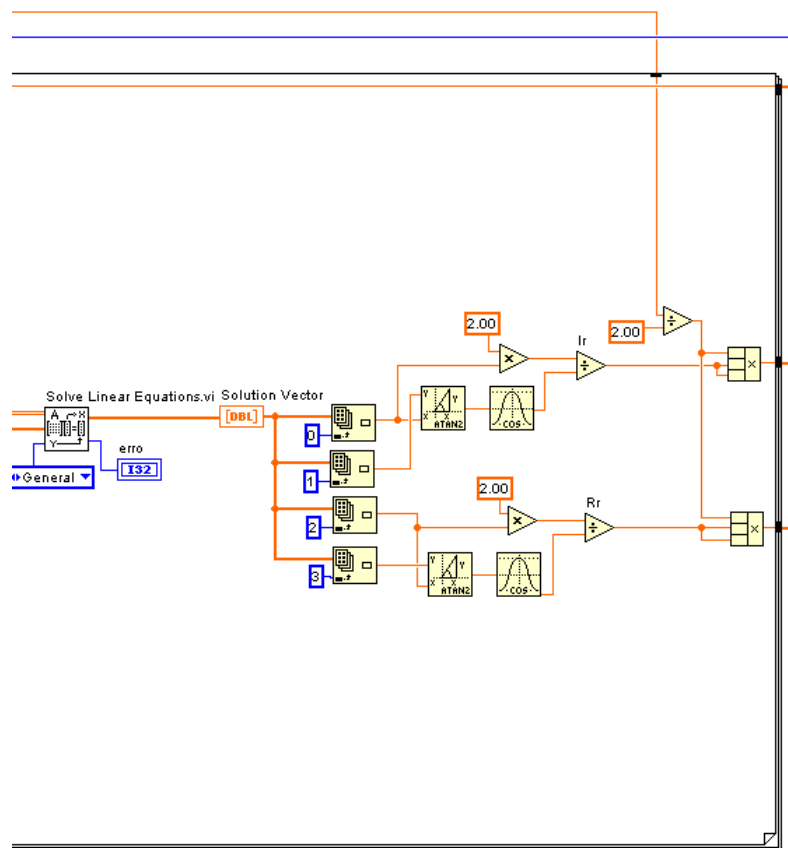
(→)

ANEXO 6 - LISTA DE MÓDULOS E ROTINAS SAM



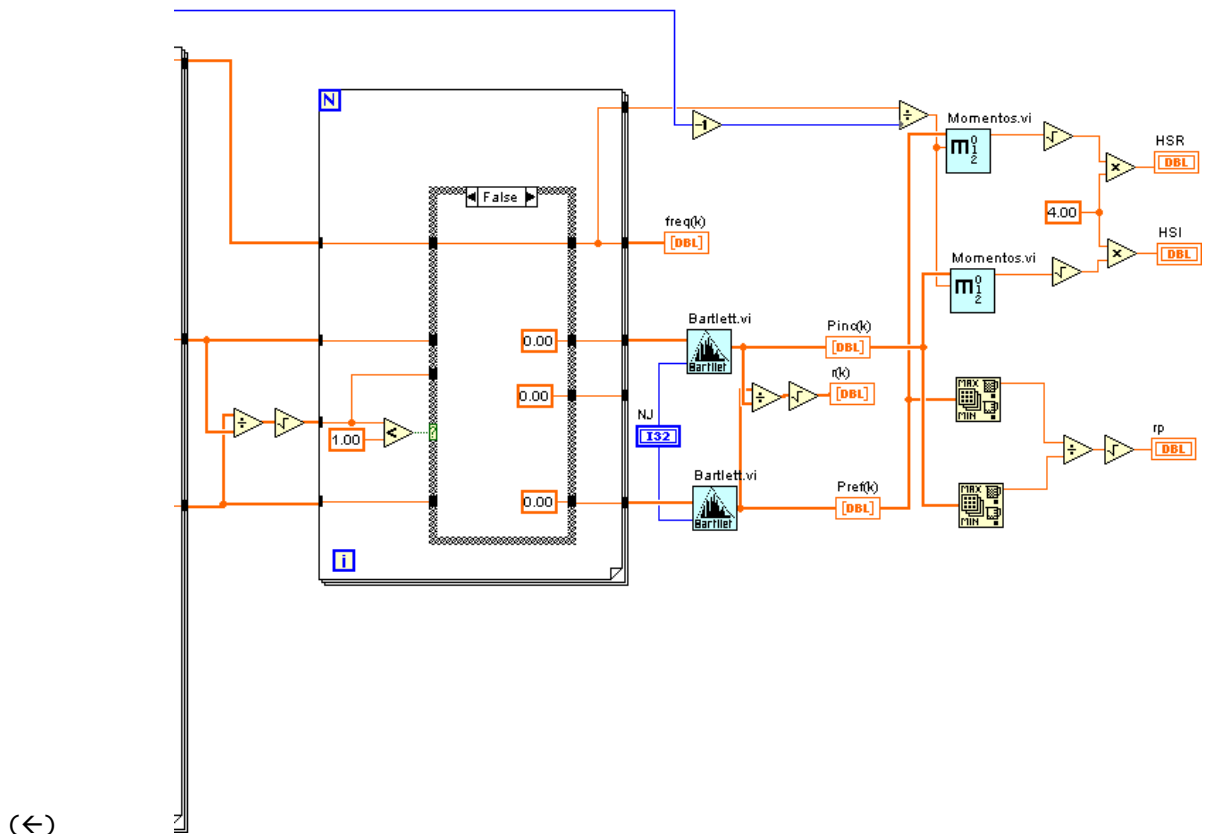
(←)

(→)

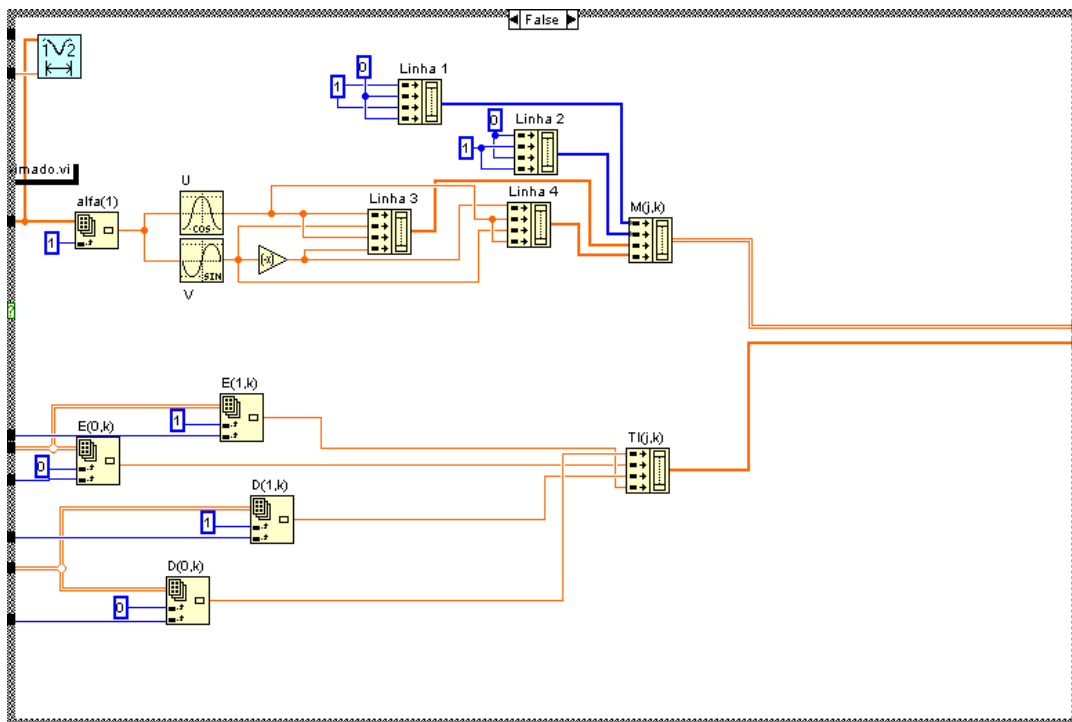


(←)

(→)

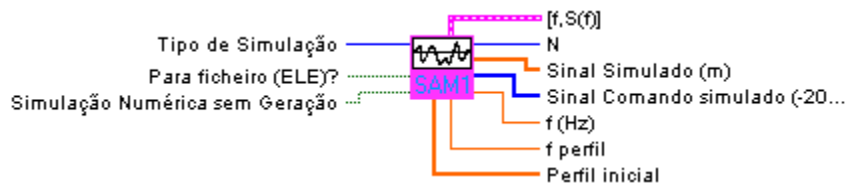


(←)



## SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ONDAS.VI

Rotina auxiliar de simulação numérica de ondas.



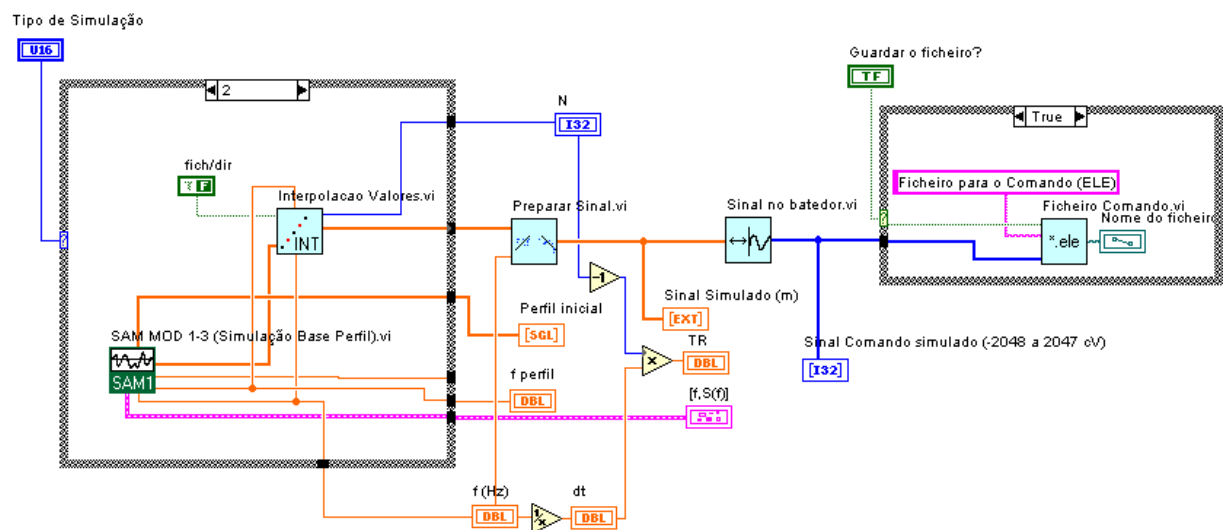
### CONTROLOS E INDICADORES

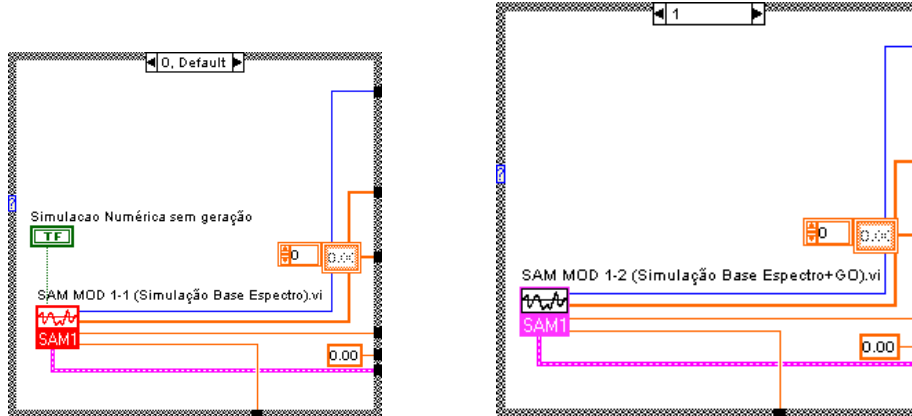
**DBL** dt Intervalo de digitalização, ou intervalo de tempo entre observações, inverso de fd, em s.

**TF** Para ficheiro (ELE)? Selector que possibilita guardar os valores do ficheiro de comando do batedor, geralmente de extensão ELE.








**U16** Tipo de Simulação Escolha do método segundo o qual se vai produzir agitação na água. Os métodos existentes são:  
 1- Espectro - Método da Fase Aleatória  
 2- Espectro + Grupos de Ondas - Método da Escalagem  
 3- Perfil Dado - Método da integração da velocidade horizontal

### CÓDIGO LABVIEW





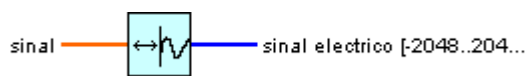
## LISTA DE SUBROTINAS (SUBVI)

- 
Ficheiro Comando.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Ficheiro Comando.vi
  
- 
Interpolação Valores.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Interpolação Valores.vi
  
- 
Preparar Sinal.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Preparar Sinal.vi
  
- 
SAM MOD 1-1 (Simulação Base Espectro).vi  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 1-1 (Simulação Base Espectro).vi
  
- 
SAM MOD 1-2 (Simulação Base Espectro+GO).vi  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 1-2 (Simulação Base Espectro+GO).vi
  
- 
SAM MOD 1-3 (Perfil Dado).vi  
C:\Users\RCapitao\LabVIEW\Program\SAM MOD 1-3 (Perfil Dado).vi
  
- 
Sinal no batedor.vi  
C:\Program Files\LabVIEW\user.lib\Sinal no batedor.vi



## SINAL NO BATEDOR.VI

Cálculo do sinal eléctrico do batedor, dados o sinal temporal simulado e seu valor máximo. O sinal eléctrico calculado variará, nas presentes condições, entre -2047 cV e 2048 cV. A amplitude máxima do cursor é, já se vê, de 4096 cV.



### CONTROLOS E INDICADORES

**[I32]** sinal eléctrico [-2048..2047] cV Sinal de comando limitado, em unidades cV.

**[EXT]** sinal Registo.

### CÓDIGO LABVIEW

