

# Simulação numérica de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante: comparação de dois códigos numéricos

José M. Paixão Conde<sup>1,2</sup>, Paulo R. F. Teixeira<sup>3</sup> & Eric Didier<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup> *Dep. Eng. Mecânica e Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal - jpc@fct.unl.pt*

<sup>2</sup> *IDMEC, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal*

<sup>3</sup> *Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália, km 8, Campus Carreiros, 96201-900, Rio Grande, RS, Brasil - pauloteixeira@furg.br*

<sup>4</sup> *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal - edidier@lnec.pt*

<sup>5</sup> *MARETEC, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal*

**RESUMO:** Neste artigo apresentam-se os resultados da aplicação de dois códigos numéricos na simulação de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante. Um dos códigos (FLUINCO) é baseado na técnica dos elementos finitos e o outro (FLUENT) na técnica dos volumes finitos. O objectivo do trabalho consiste na validação destes códigos para este tipo de escoamento, com o intuito de os aplicar de forma sistemática no projecto de sistemas de aproveitamento de energia das ondas. O caso simulado, que corresponde a um modelo simplificado testado experimentalmente, permitiu concluir da boa qualidade dos resultados obtidos, existindo uma boa correspondência entre os resultados experimentais e os obtidos pelos códigos numéricos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia das ondas, Coluna de água oscilante, Simulação numérica, FLUINCO, FLUENT.

**ABSTRACT:** In this paper the results from the application of two numerical codes in the simulation of an oscillating water column wave energy device are presented. One of the codes (FLUINCO) is based on the finite elements technique and the other one (FLUENT) is based on the finite volume technique. The objective of the work is the validation of these codes for this type of flow, aiming the systematic application to wave energy system projects. The simulated case, corresponding to a simplified model tested experimentally, allows to conclude that numerical results have good quality, showing good correspondence among experimental and numerical results.

**KEYWORDS:** Wave energy, Oscillating water column, Numerical simulation, FLUINCO, FLUENT.

## 1. INTRODUÇÃO

A potência associada às ondas que atingem todas as zonas costeiras do mundo está estimada em aproximadamente  $10^{12}$  W. Se esta energia for captada em mar aberto, logo sem as perdas associadas ao atrito e à rebentação das ondas, este valor estima-se que seja uma ordem de grandeza superior ( $\sim 10^{13}$  W), uma quantidade comparável ao consumo actual de energia no mundo [12, 23]. Embora este valor seja apenas uma pequena parcela do potencial das energias eólica e solar, o potencial de utilização em grande escala da energia das ondas oceânicas tem a capacidade de cobrir uma parcela considerável do consumo de energia eléctrica a nível mundial.

A utilização da energia das ondas ao longo das zonas costeiras é uma opção atractiva particularmente em regiões de latitude alta. Ao longo das costas do Norte da Europa, Norte da América, Nova Zelândia, Chile e Argentina, por exemplo, são encontradas altas densidades médias anuais de energia das ondas (tipicamente entre 40 e 100 kW/m de frente de onda) [20]. A potência estimada na região sul do Brasil é de 30 kW/m, sendo um recurso possível de ser explorado.

O desenvolvimento da tecnologia de aproveitamento de energia das ondas para a produção de energia eléctrica em larga escala teve início em meados dos anos 1970, quando ocorreu o primeiro choque petrolífero. As tecnologias de transformação da energia contida nas ondas marítimas integram grande multidisciplinaridade de conhecimentos.

Apesar de já ter sido proposta uma grande variedade de sistemas de conversão de energia das ondas, com base em vários métodos de extracção desta energia, apenas alguns protótipos reais foram construídos e instalados em águas costeiras expostas e ligados à rede eléctrica.

Basicamente, os sistemas de extracção de energia das ondas podem ser classificados conforme dois critérios: a localização da instalação e o modo de conversão de energia [2, 9]. Quanto ao primeiro critério, os dispositivos agrupam-se em três classes: costeiros (em inglês, *shoreline*); próximos da costa (em inglês, *near-shore*); e ao largo (em inglês, *offshore*). Conforme o segundo critério, os sistemas são classificados em: coluna de água oscilante (em inglês, *oscillating water column*); corpos oscilantes, podendo ser de absorção pontual (em inglês, *point absorbers*) ou progressivos (em inglês, *surging devices*); e galgamento (em inglês, *overtopping devices*).

O sistema de coluna de água oscilante (CAO) é considerado o tipo de dispositivo de aproveitamento da energia das ondas (DAEO) do oceano tecnicamente mais conhecido, em virtude do grande esforço de investigação de que foi objecto nos últimos anos. Um DAEO-CAO é constituído por uma estrutura parcialmente submersa, aberta abaixo da superfície livre da água, dentro da qual fica aprisionada uma bolsa de ar acima da superfície livre. O movimento oscilatório da superfície livre no interior na câmara pneumática, produzido pelas ondas incidentes, faz o ar escoar pela turbina que está directamente acoplada ao gerador eléctrico [11]. Quanto mais próximos forem as frequências das ondas da frequência natural da coluna de água, maior será a energia captada.

Já foram construídas diversas instalações junto a costa, em diferentes partes do mundo (Toftstalen, Noruega, 1985; Sakata, Japão, 1988; Trivandrum, Índia, 1990; Pico, Portugal, 1999; Limpet, Escócia, 2000; Port Kembla, Austrália, 2005). Embora os sistemas costeiros tenham as vantagens da facilidade de acesso e da ausência de amarrações, nesse caso a energia incidente é menor, comparada com a disponível ao largo, devido aos efeitos dissipativos da rebentação e do atrito com o fundo. A evolução dos sistemas costeiros para sistemas ao largo, onde a energia das ondas é superior, é

vantajosa uma vez que estes últimos não estão constrangidos pela morfologia da costa, nem sujeitos aos efeitos das marés. Foram já desenvolvidos alguns sistemas CAO do tipo flutuante, citam-se: Migthy Whale (Japão), Energetech (Austrália), OE buoy (Irlanda), Sperboy (Inglaterra). A médio prazo, prevê-se a instalação de parques de sistemas flutuantes de DAEO-CAO, ao largo da costa, em zonas com profundidades de 40 a 70 m [4].

A cadeia de conversão energética num DAEO-CAO é composta por: conversão da energia das ondas para energia pneumática na câmara-de-ar da CAO; conversão de energia pneumática para energia mecânica ao veio da turbina; e conversão para energia eléctrica no alternador. Não é prática corrente a utilização de um único código numérico para simular a totalidade dos efeitos verificados neste tipo de dispositivo. Este código deve simular com precisão, num domínio tridimensional, a propagação das ondas e a sua transformação quanto sujeitas à influência do DAEO-CAO, a entrada e saída da água no dispositivo, o escoamento de ar na câmara pneumática e o amortecimento provocado neste sistema pela perda de pressão verificada na turbina. Uma correcta simulação destes escoamentos é fundamental para avaliar o desenho da câmara pneumática e para a determinação das condições de funcionamento da turbina [22].

Algumas técnicas foram usadas para simular a interação do DAEO-CAO com as ondas incidentes. Evans [6] simulou a superfície livre pelo movimento de um pistão rígido sem massa para o caso de um tubo vertical de diâmetro pequeno em relação ao comprimento da onda. Nesse modelo teórico, o sistema de captação de energia (em inglês, *Power Take-off* - PTO) é simulado por um sistema linear massa-mola-amortecedor. Falcão e Sarmiento [10] e Evans [7] consideram uma superfície oscilante com distribuição de pressão uniforme. A potência instantânea absorvida das ondas é o produto do caudal volumétrico deslocado pela superfície livre interna e a pressão de ar na câmara pneumática. Outros autores usaram códigos baseados no método dos elementos de fronteira (em inglês, *Boundary Element Method* – BEM), destacando-se os trabalhos de Lee et al. [16], Brito e Melo [3], Delauré e Lewis [5] e Lopes *et al.* [18].

O estudo desse tipo de problema está mais próximo da realidade, se na simulação numérica for usado um modelo que considere as equações completas de Navier-Stokes. Por isso, no presente trabalho comparam-se os resultados obtidos pela aplicação de dois códigos numéricos, FLUINCO [26] e FLUENT [13], para simular a acção de ondas regulares sobre um modelo de DAEO-CAO testado em laboratório [18].

O código FLUINCO utiliza o método semi-implícito de Taylor-Galerkin de dois passos para discretizar no tempo e no espaço as equações de Navier-Stokes. Adota um elemento tetraédrico linear, o qual tem a vantagem de se adaptar aos domínios de geometrias complexas e de ser um elemento de boa eficiência computacional. Uma formulação lagrangeana-euleriana arbitrária (em inglês, *Arbitrary Lagrangian-Eulerian* - ALE) é utilizada para permitir a solução de problemas que envolvem grandes movimentos relativos entre corpos e superfícies e movimentos da superfície livre. A distribuição espacial da velocidade da malha é tal que a distorção dos elementos é minimizada pela sua suavização através do uso de funções que ponderam a influência da velocidade de cada nó pertencente às superfícies de contorno.

O código comercial FLUENT, resolve as equações de Navier-Stokes e utiliza a técnica VoF (do inglês, *Volume of Fluid*), para simular a propagação de ondas regulares e a sua acção sobre estruturas.

Neste artigo, na secção 2 apresenta-se uma descrição dos códigos numéricos usados. A descrição do problema estudado e das condições de simulação são apresentados na secção 3. Na secção 4 apresentam-se os resultados e sua discussão. Por último, têm-se na secção 5 a conclusão do artigo.

## 2. CÓDIGOS NUMÉRICOS

### 2.1. Código FLUINCO

O código desenvolvido por Teixeira [26], denominado de FLUINCO, integra as equações de Navier-Stokes de forma completa. O modelo utiliza um método fraccionado para simular problemas de escoamentos 3D de fluidos incompressíveis com superfície livre. Emprega o método semi-implícito de Taylor-Galerkin de dois passos para discretizar no tempo e no espaço as equações de Navier-Stokes. É empregada uma formulação lagrangeana-euleriana arbitrária, ALE, para permitir a solução de problemas que envolvem grandes movimentos relativos entre corpos e superfícies e movimentos da superfície livre.

Basicamente, o algoritmo consiste nos passos descritos a seguir [27]:

(a) Cálculo da velocidade não-corrigida no instante  $\Delta t/2$ , a qual o termo de pressão está no instante  $t$ , conforme a Equação 1.

$$\tilde{U}_i^{n+1/2} = U_i^n - \frac{\Delta t}{2} \left( \frac{\partial f_{ij}^n}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^n}{\partial x_j} + \frac{\partial p^n}{\partial x_i} - w_j^n \frac{\partial U_i^n}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (1)$$

onde  $\rho$  é a massa específica,  $p$  a pressão,  $U_i = \rho v_i$ ,  $f_{ij} = v_j(\rho v_i) = v_j U_i$ ,  $v_i$  as componentes de velocidade,  $w_i$  a velocidade do sistema de referência e  $\tau_{ij}$  o tensor de tensões viscosas ( $i, j = 1, 2, 3$ ).

(b) Actualização da pressão dinâmica  $p$  para o instante  $t+\Delta t$ , a partir da Equação de Poisson dada por:

$$\frac{1}{c^2} \Delta p = -\Delta t \left[ \frac{\partial \tilde{U}_i^{n+1/2}}{\partial x_i} - \frac{\Delta t}{4} \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \Delta p}{\partial x_i} \right] \quad (i = 1, 2, 3). \quad (2)$$

sendo  $\Delta p = p^{n+1} - p^n$ .

(c) Correção da velocidade em  $t+\Delta t/2$ , acrescentando o termo de variação da pressão do instante  $t$  para o instante  $t+\Delta t/2$ , conforme a equação:

$$U_i^{n+1/2} = U_i^n - \frac{\Delta t}{2} \left( \frac{\partial f_{ij}^n}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^n}{\partial x_j} + \frac{\partial p^n}{\partial x_i} + \frac{1}{2} \frac{\partial \Delta p}{\partial x_i} - w_j^n \frac{\partial U_i^n}{\partial x_i} \right) \quad (i, j=1, 2, 3), \quad (3)$$

(d) Cálculo da velocidade em  $t+\Delta t$  a partir das actualizações realizadas nos passos anteriores, como segue:

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \Delta t \left( \frac{\partial f_{ij}^{n+1/2}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^{n+1/2}}{\partial x_j} + \frac{\partial p^{n+1/2}}{\partial x_i} - w_j^{n+1/2} \frac{\partial U_i^{n+1/2}}{\partial x_i} \right) \quad (i, j=1, 2, 3). \quad (4)$$

Para a discretização no espaço é aplicado o método clássico dos resíduos ponderados de Galerkin nas Eq. (1) a (4), empregando um elemento tetraédrico. Utiliza-se uma

função de interpolação constante para as variáveis no instante  $t+\Delta t/2$ , enquanto que em  $t$  e  $t+\Delta t$  é empregada uma função de interpolação linear. O elemento tetraédrico tem a vantagem de se adaptar aos domínios de geometrias complexas e de ser um elemento de boa eficiência computacional.

O modelo FLUINCO considera a superfície livre sujeita a uma pressão atmosférica constante (geralmente o valor de referência é nulo) e impõe a condição de contorno cinemática da superfície livre (CCCSL), usando a formulação ALE que é expressa da forma [25]:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left( {}^{(s)}v_i - {}^{(s)}w_i \right) \frac{\partial \eta}{\partial x_i} = 0 \quad (i=1, 2, 3), \quad (5)$$

onde  $\eta$  é a elevação de superfície,  ${}^{(s)}v_i$  e  ${}^{(s)}w_i$  são as componentes de velocidade do fluido e da malha na superfície livre, respectivamente. O sistema de coordenadas adopta as direções  $x$  e  $y$  no plano horizontal, onde se utiliza uma formulação euleriana, e  $z$  na direção vertical, onde a formulação usada é a ALE. A discretização temporal da CCCSL é realizada de forma análoga à apresentada para as equações de quantidade de movimento, adoptando elementos triangulares coincidentes com as faces dos tetraedros da superfície livre.

A distribuição espacial da velocidade da malha é tal que a distorção dos elementos é minimizada pela sua suavização através do uso de funções que ponderam a influência da velocidade de cada nó pertencente às superfícies de contorno.

Para modelar a turbulência utiliza-se uma viscosidade turbulenta, definida por Mittal e Tezduyar [19], como segue:

$$\nu_t = (k lm)^2 \sqrt{2(S_{ij}S_{ij})} \quad (i, j=1, 2, 3), \quad (6)$$

onde  $k = 0,41$  é a constante de Von Kármán,  $S_{ij}$  é dado por:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j=1, 2, 3), \quad (7)$$

$lm$  é o comprimento de mistura que, para este problema, é calculado conforme a proposta de Johns [15], como abaixo:

$$lm = \frac{(z+h+z_0)(\eta-z+z_s)}{h+\eta+z_0+z_s} \quad (i, j=1, 2, 3), \quad (8)$$

sendo  $\eta$  a elevação da superfície,  $z_0$  e  $z_s$  os comprimentos de rugosidade do fundo e da superfície livre, respectivamente (no presente trabalho iguais a 0,0067 m e 0,0004 m) e  $h$  a profundidade.

## 2.2. Código FLUENT

O código FLUENT (versão 6.3.26) aplica uma técnica de volumes finitos para resolver a equação da continuidade e as equações de Navier-Stokes. Neste código as variáveis são definidas no centro de cada elemento. Os termos difusivos das equações

são discretizados pelo esquema de diferenças centrais de segunda ordem. Estão disponíveis diferentes esquemas de interpolação para os termos convectivos (*Upwind* de primeira ordem, lei de potência de primeira ordem, *Upwind* de segunda ordem, MUSCL e QUICK), diferentes algoritmos de resolução (Acoplado, SIMPLE, SIMPLEC e PISO) e diferentes modelos de turbulência [13]. A modelação da superfície livre é feita utilizando o método VoF. Este método, desenvolvido inicialmente por Hirt e Nichols [14], identifica a posição da superfície livre a partir de um indicador escalar, a fracção de volume, que toma o valor de 0 no ar e 1 na água. A posição da superfície livre é definida arbitrariamente pelo valor 0,5.

Nas simulações efectuadas no âmbito deste artigo foram utilizados: o módulo tridimensional do código; a formulação implícita e discretização temporal de 2ª ordem; e o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  standard. Na resolução do sistema de equações utilizou-se o algoritmo SIMPLEC, com subrelaxação apenas nas equações de  $k$  e  $\varepsilon$ , sendo o coeficiente de subrelaxação igual a 0,8. Os termos convectivos nas faces dos volumes de controlo para as componentes da quantidade de movimento,  $k$  e  $\varepsilon$  são determinados pelo esquema *Upwind* de 2ª ordem. A fracção de volume nas faces dos volumes de controlo é determinada por uma versão modificada do esquema HRIC (do inglês, *High Resolution Interface Capturing* [24]). A pressão é determinada pelo esquema PRESTO! (do inglês, *PREssure STaggering Option*) [13].

### 3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO

Neste artigo pretende-se reproduzir um dos ensaios experimentais descritos por Lopes *et al.* [18]. A Figura 1a mostra um desses ensaios realizados com protótipo no canal de testes do Departamento de Arquitectura e Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico (IST), em Lisboa, Portugal. Este canal tem 20 m de comprimento e 0,70 m de largura.

O modelo físico simplificado do DAEO-CAO consiste num cilindro oco aberto nas extremidades e colocado na vertical (Figura 1b). O seu eixo está coincidente com o plano de simetria do canal e a 9 m do gerador de ondas. O cilindro tem raio interno ( $r = d/2$ ) e espessura ( $t$ ) iguais a 0,025 m e 0,0025 m, respectivamente. A profundidade da água em repouso ( $D$ ) e a amplitude das ondas ( $a$ ) são iguais a 0,4 m e 0,015 m, respectivamente.

No estudo experimental foram considerados: diferentes comprimentos submersos ( $s$ ), respectivamente, 0,1 m; 0,18 m; e 0,245 m; diferentes frequências ( $f$ ) na faixa de 0,5 Hz a 1,6 Hz; e foram feitos ensaios com o topo do cilindro aberto para a atmosfera e com a imposição de uma perda de carga. No presente estudo consideram-se apenas os ensaios sem perda de carga e considerando  $s = 0,18$  m.

No intervalo de frequência considerado (0,5 a 1,6 Hz) a razão  $D/L$  (onde  $L$  é o comprimento de onda) encontra-se compreendida entre 0,11 e 0,66. Apenas para as frequências superiores a 1,4 Hz as ondas incidentes se encontram na condição de água profunda ( $D/L > 0,5$ ), as restantes encontram-se em profundidade intermédia ( $0,5 > D/L > 0,05$ ) [17].

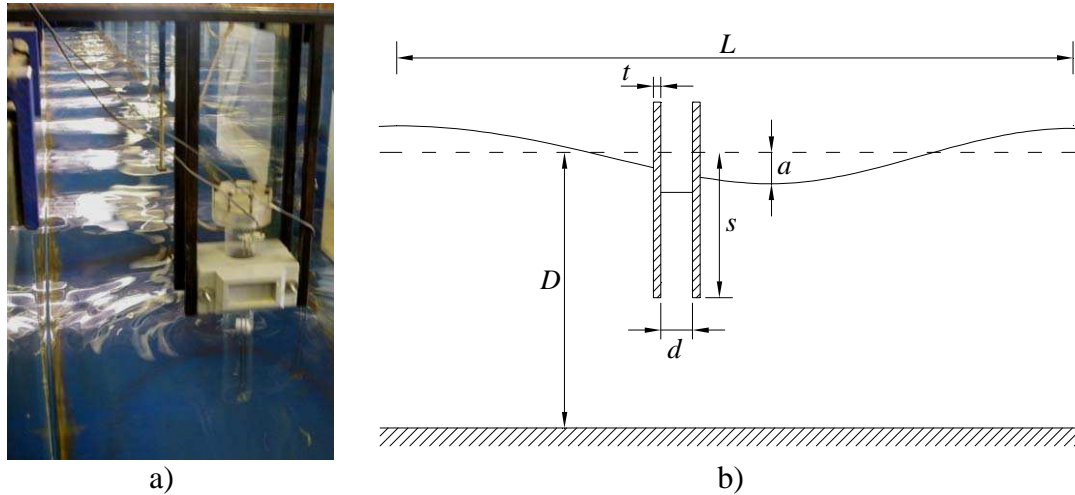


Figura 1. a) Ensaio em modelo físico [18]; b) esquema do problema.

Embora a razão diâmetro exterior do cilindro pela largura do canal seja pequena ( $\sim 7,9\%$ ), as experiências não traduzem o efeito de um único dispositivo isolado em mar aberto, mas sim um número infinito de dispositivos lado a lado perpendicularmente às ondas incidentes, uma vez que as paredes do canal actuam como planos de simetria.

O regime de escoamento devido a interacção onda-estrutura pode ser melhor entendido pelo cálculo do número de Keulegan-Carpenter,  $KC = uT/d_e$ , onde  $u$  é a amplitude da velocidade máxima do escoamento (neste caso a velocidade da onda à superfície),  $T$  o período da onda e  $d_e$  o diâmetro externo do cilindro. Os valores de  $KC$  para os casos estudados ficaram entre 1,7 e 2,9. Nesta faixa de  $KC$ , as forças de inércia são predominantes em relação às de arrasto ( $KC < 3$  para um cilindro circular vertical submerso até o fundo).

A relação  $d_e/L$  é outro parâmetro usado para analisar a interacção onda-estrutura. Para os casos estudados, esta relação varia de 0,015 a 0,09, sendo que os valores mais elevados se referem a ondas de frequências mais altas. Nota-se que quanto maior for esta relação, mais significativo é o efeito de difracção sobre a transformação da onda (considera-se que para  $d_e/L < 0,2$ , os efeitos de difracção podem ser desprezados).

Ressalta-se que, no presente trabalho, o cilindro é parcialmente submerso, o que difere dos casos estudados por diversos autores que estabeleceram limites para estes parâmetros do escoamento. Além disso, o cilindro é oco, havendo por isso uma interacção entre a massa de fluido do interior do cilindro com o escoamento externo. Constatou-se [21, 28] a presença de turbulência na região próxima a extremidade submersa do cilindro, sendo essa razão a principal razão de se terem utilizado modelos de turbulência.

Aproveitando a simetria do problema em relação ao plano longitudinal e vertical, o domínio computacional é apenas metade do domínio real ( $0 \leq y \leq 0,35$  m) nas simulações efectuadas com ambos os códigos.

### 3.1. Código FLUINCO

Nas simulações efectuadas com o código FLUINCO o canal numérico possui 5,5 m de comprimento e o eixo do cilindro está a 2,0 m da extremidade de geração das ondas.

A malha de elementos finitos possui 121420 nós e 664383 tetraedros (Figura 2a). O tamanho médio da aresta dos elementos localizados na região a montante do cilindro é de aproximadamente 0,02 m. Na região próxima ao cilindro, adoptou-se um tamanho médio de aresta de elemento de 0,002 m, equivalente a 40 divisões da circunferência

interna do cilindro. O passo de tempo adoptado foi de 0,0002 s, que satisfaz a condição limite de Courant, ou seja,  $V\Delta t/\Delta x < C$ , com  $C = 0,25$ . O valor de  $\Delta t$  é obtido para cada elemento, sendo escolhido o menor entre eles em todo o domínio [26].

A onda monocromática é gerada pela imposição directa da elevação da superfície e das componentes horizontal e vertical da velocidade determinadas a partir dos perfis de velocidade e posição da superfície livre obtidos pela teoria linear das ondas.

### 3.2. Código FLUENT

Nas simulações feitas com o código FLUENT o eixo do cilindro está na posição  $x = y = 0$  e a superfície livre em repouso na posição  $z = 0$ . O canal numérico prolonga-se apenas até  $x/L \approx -1$  no sentido do gerador de ondas e até  $x/L \approx 4$  no sentido oposto. Na direcção vertical o domínio está compreendido entre  $-0,4 \text{ m} \leq z \leq 0,07 \text{ m}$  e o cilindro prolonga-se desde  $z = -0,18 \text{ m}$  (na água) até à fronteira superior (no ar). A malha de discretização utilizada é composta aproximadamente por  $4,9 \times 10^5$  volumes de controlo para a frequência mais elevada e por  $6,8 \times 10^5$  volumes de controlo para a frequência mais baixa, sendo mais refinada nas proximidades do cilindro (Figura 2b). O perímetro da semi-circunferência do cilindro é discretizado por 40 segmentos. Na região de propagação das ondas,  $-0,02 \text{ m} \leq z \leq 0,02 \text{ m}$ , a discretização é composta de 24 segmentos iguais, ou seja, 18 segmentos por altura de onda. Desde  $x/L = -1$  até  $x/L = 1$  utilizam-se aproximadamente 60 segmentos por comprimento de onda. Desde  $x/L = 1$  até  $x/L = 4$  (zona de dissipação) o comprimento dos segmentos é progressivamente aumentado até atingir  $\sim 0,35L$  no adjacente à parede direita.

Como condições iniciais, foram impostas as componentes da velocidade, nulas em todo o domínio, e a pressão hidrostática, considerando-a nula na superfície livre. A onda monocromática é gerada na fronteira vertical com  $x = -L$  pela imposição directa da elevação da superfície e das componentes horizontal e vertical da velocidade. Estas condições foram escritas numa rotina UDF (do inglês, *User Defined Function*) [13] a partir dos perfis de velocidade e posição da superfície livre obtidos pela teoria linear das ondas [17].

No fundo do canal, na parede oposta ao gerador de ondas e nas paredes do cilindro é utilizada a condição de aderência com velocidade nula. Na fronteira superior é imposta a pressão atmosférica, permitindo a entrada ou saída do ar. O passo de tempo usado é  $T/640$ . Foi imposto um número máximo de 5 iterações por cada passo de tempo, este valor é suficiente para reduzir todos os resíduos a valores inferiores a  $10^{-3}$  [1].

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente analisa-se o caso cuja frequência da onda incidente é de 0,9 Hz. A Figura 3 apresenta a evolução temporal da elevação da superfície livre, em duas sondas colocadas no plano transversal coincidente com o eixo do cilindro: uma está localizada no interior do cilindro (no eixo); e a outra no exterior numa posição intermédia entre a parede do canal e a do cilindro.

Constatou-se que é necessário decorrer aproximadamente 10 períodos de onda para que a evolução da superfície livre, medida nas duas sondas, estabilize. Após a estabilização, observa-se que os resultados numéricos têm boa concordância entre si e com os dados experimentais.



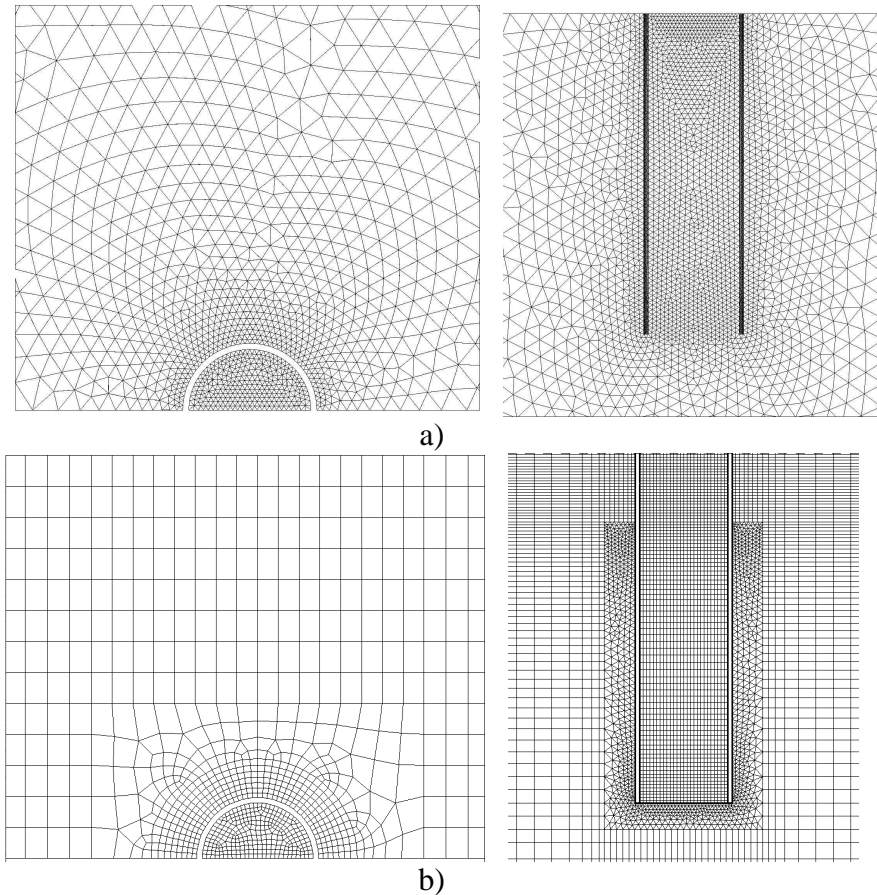


Figura 2. Pormenores da malha de discretização: a) FLUINCO; b) FLUENT.

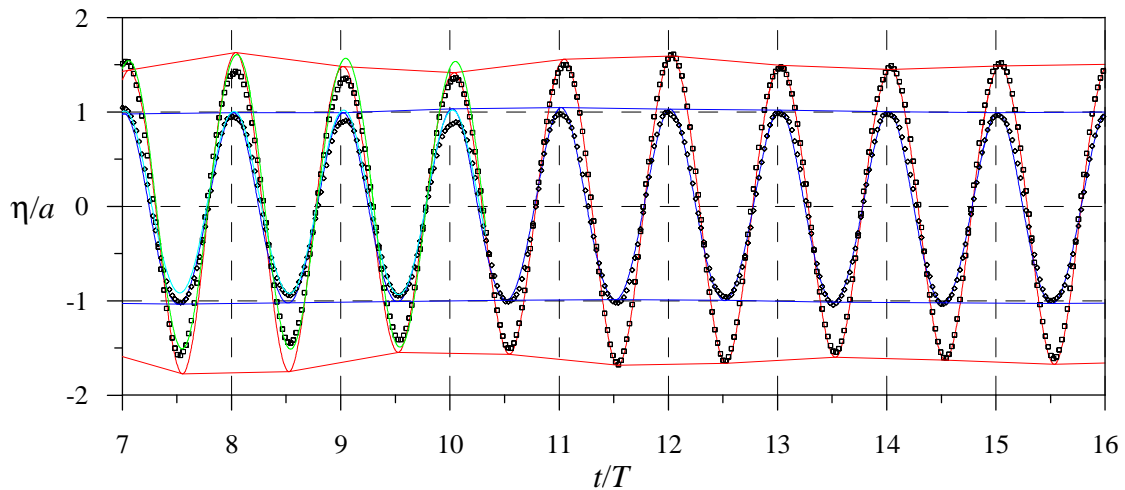


Figura 3. Comparação da evolução temporal da elevação da superfície livre, no interior e no exterior do cilindro, obtidas pelos dois códigos numéricos, com os correspondentes dados experimentais [18], para  $f = 0,9$  Hz. FLUINCO (— sonda interior; — sonda exterior), FLUENT (— sonda interior; — sonda exterior) e experimental ( $\diamond$  sonda interior;  $\square$  sonda exterior)

Embora não se apresente graficamente neste artigo, é de referir que, para esta frequência, se constata que existem fortes gradientes de velocidade e assimetria no escoamento nas imediações da abertura inferior do cilindro [21, 28]. Apesar deste efeito, verifica-se uma uniformização do escoamento no sentido da superfície livre, o que contribui para a forma plana horizontal que esta adquire ao longo de todo o período.

Este comportamento constata-se, quer pela representação gráfica da superfície livre em vários instantes, quer por sondas de superfície livre colocadas em várias posições no interior do cilindro. Lopes *et al.* [18] obtiveram o mesmo efeito através de simulação numérica com o uso do programa comercial de elementos de fronteira WAMIT [29].

Nas figuras 4c a 4l apresentam-se as comparações da evolução temporal da elevação da superfície livre no interior e no exterior do cilindro, obtidos pelos dois códigos numéricos, na gama de frequências 0,6-1,5 Hz. Nas figuras 4a, 4b e 4m apresentam-se apenas as simulações obtidas com o código FLUENT. Nestas figuras apresentam-se também os envelopes da elevação das superfícies livres, no interior e no exterior do cilindro, obtidas pelo código FLUENT.

Para as frequências 0,5 e 0,55 Hz constatou-se o aparecimento de uma segunda frequência no interior do cilindro na fase descendente. Este efeito é responsável pela mudança de comportamento do factor de amplificação e do ângulo de fase (Figura 5). Lopes *et al.* [18] observaram um efeito semelhante para a frequência 0,6 Hz. Para as restantes frequências constata-se um comportamento semelhante nas simulações obtidas pelos dois códigos numéricos.

A partir dos resultados apresentados nas figuras 3 e 4 é possível estimar o factor de amplificação,  $Q$ , razão entre as elevações máximas medidas dentro e fora do cilindro, e o ângulo de fase,  $\theta$ , diferença angular entre as ondas medidas no exterior e no interior do cilindro. Na Figura 5 apresenta-se a comparação dos valores obtidos numericamente com os experimentais, para as frequências de 0,5 Hz a 1,6 Hz. Exceptuando a gama de frequências 0,5-0,6 Hz, o factor de amplificação obtido pelas simulações numéricas tem um comportamento muito aproximado do obtido experimentalmente.

Para um cilindro de pequeno diâmetro em relação ao comprimento da onda, a ressonância ocorre a uma frequência de  $f = \sqrt{g/l}$ , onde  $l$  é o comprimento do cilindro imerso na água (0,18 m para o caso estudado) e  $g$  a aceleração gravítica, resultando em  $f = 7,382 \text{ rad/s} = 1,17 \text{ Hz}$ . Pode-se observar na Figura 5 que a frequência de ressonância encontrada tanto nos ensaios experimentais como nas simulações foi em torno de 1,1 Hz, próximo ao valor teórico calculado.

Relativamente ao ângulo de fase ( $\theta$ ): constata-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais na gama 0,7-0,9 Hz; existe uma diferença entre o comportamento observado para os resultados do código FLUENT na gama 0,5-0,6 Hz e o código FLUINCO e os resultados experimentais, o que está de acordo com o observado nas figuras 4a e 4b; na região de transição em torno da frequência de ressonância (0,9-1,3 Hz) ambos os códigos numéricos tendem a sobreavaliar a desfasagem; na gama de frequências 1,3-1,6 Hz o código FLUINCO obtém resultados mais próximos dos experimentais do que o código FLUENT, que tende a sobreavaliar a desfasagem.

## 5. CONCLUSÕES

Neste artigo apresentaram-se os resultados da aplicação de dois códigos numéricos na simulação de um DAEO-CAO. Um dos códigos (FLUINCO) é baseado na técnica dos elementos finitos e o outro (FLUENT) na técnica dos volumes finitos. O objectivo do trabalho consistia na validação destes códigos para este tipo de escoamentos, com o intuito de os aplicar de forma sistemática no projecto de sistemas de aproveitamento de energia das ondas.

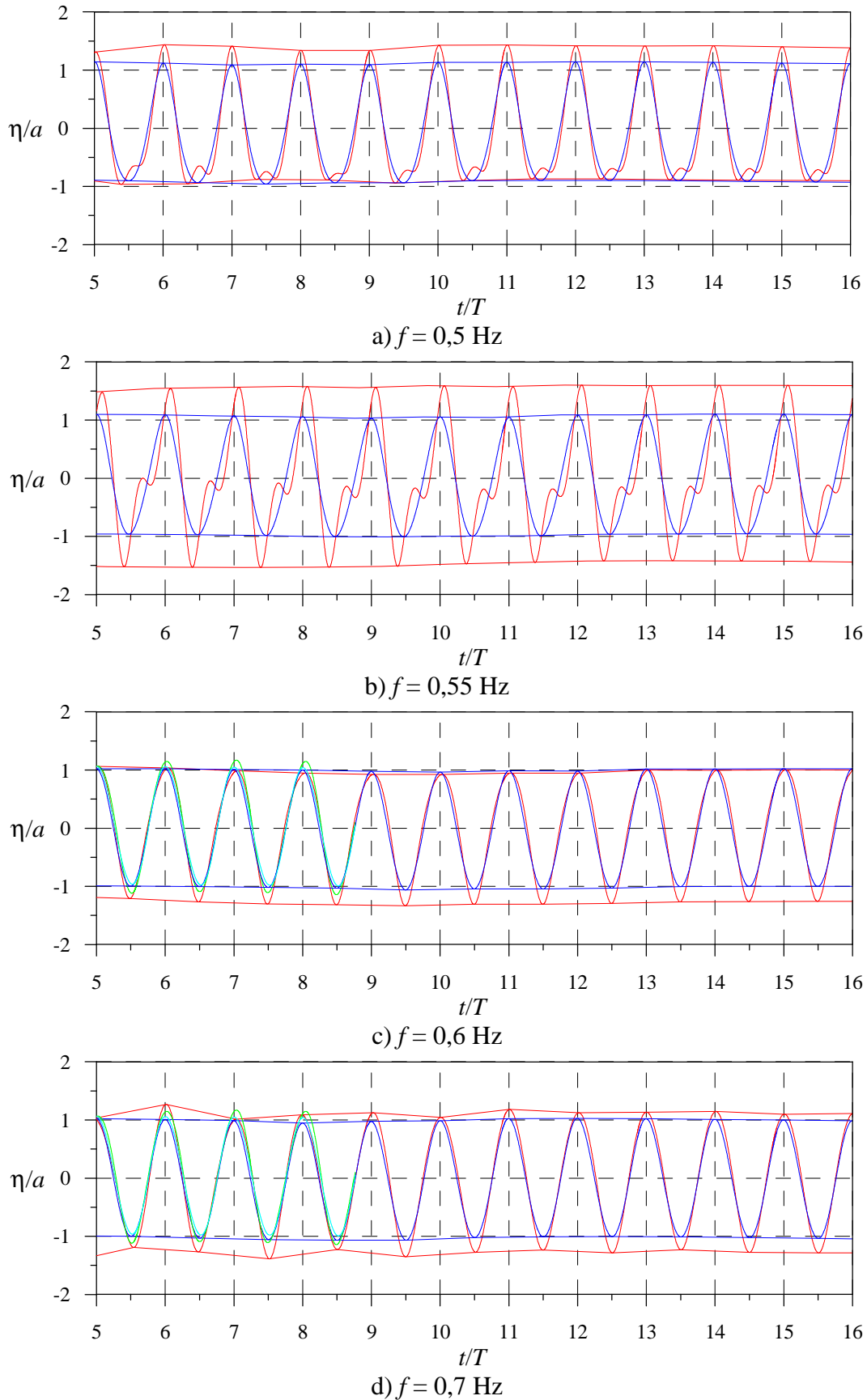


Figura 4. Comparação da evolução temporal da elevação da superfície livre, no interior e no exterior do cilindro, obtidas pelos dois códigos numéricos. FLUINCO (— sonda interior; — sonda exterior), FLUENT (— sonda interior; — sonda exterior).

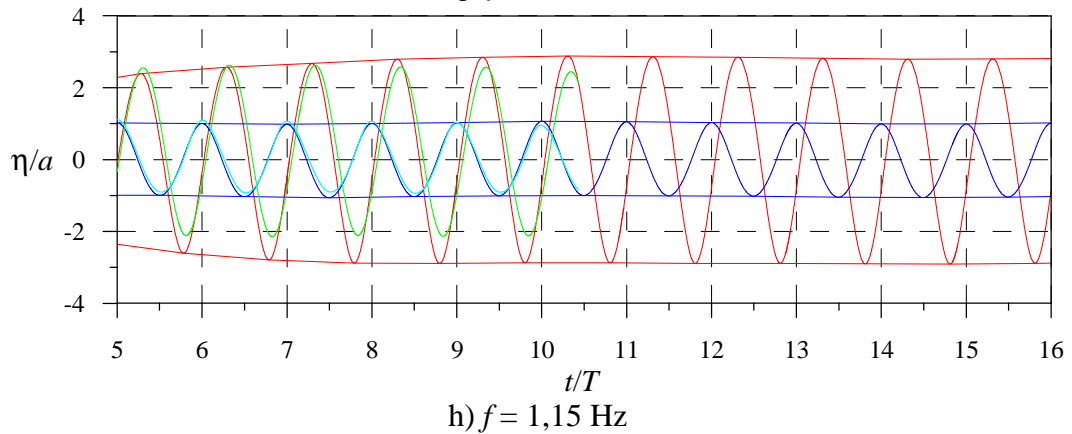
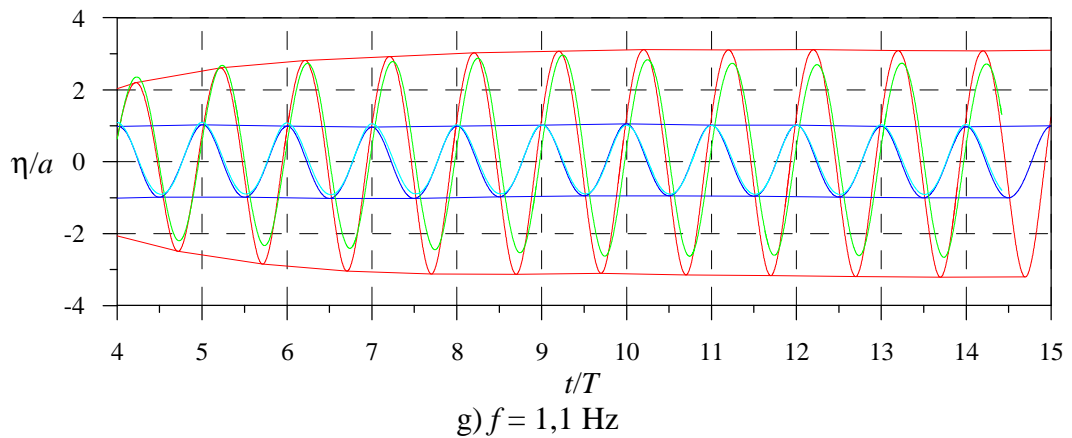
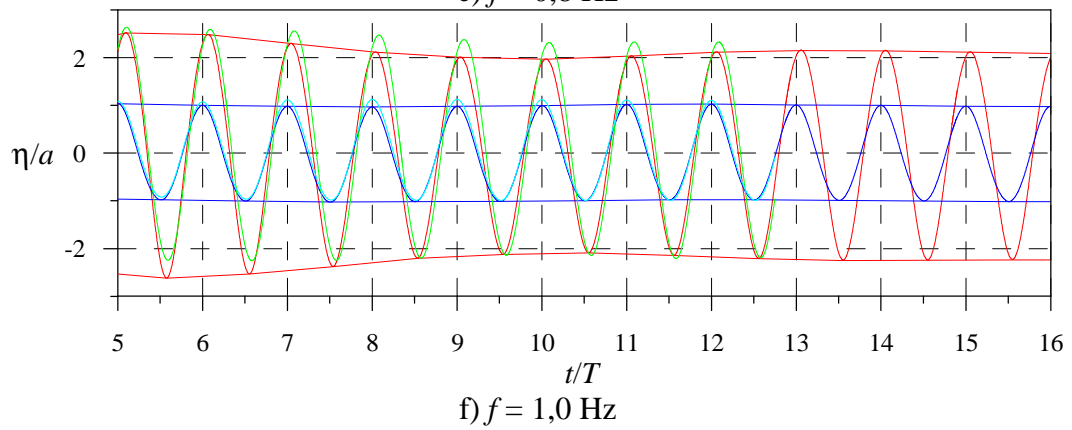
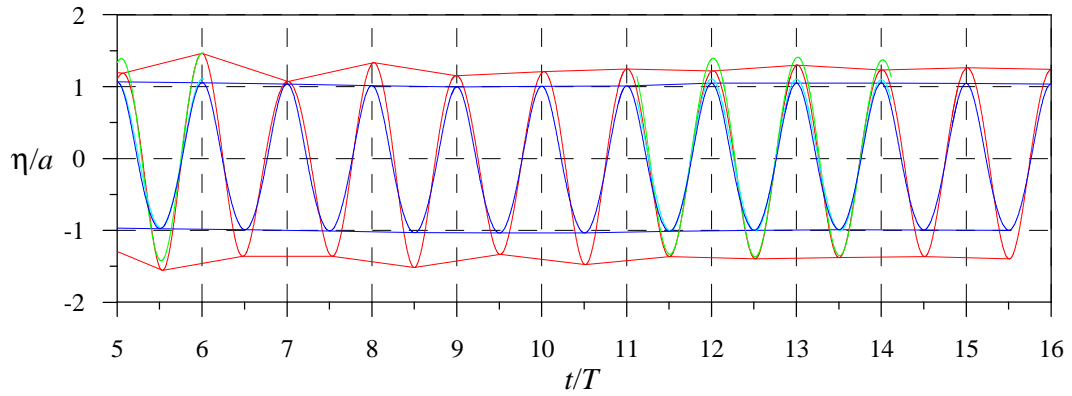


Figura 4 (Cont.). Comparação da evolução temporal da elevação da superfície livre, no interior e no exterior do cilindro, obtidas pelos dois códigos numéricos. FLUINCO (— sonda interior; — sonda exterior), FLUENT (— sonda interior; — sonda exterior).

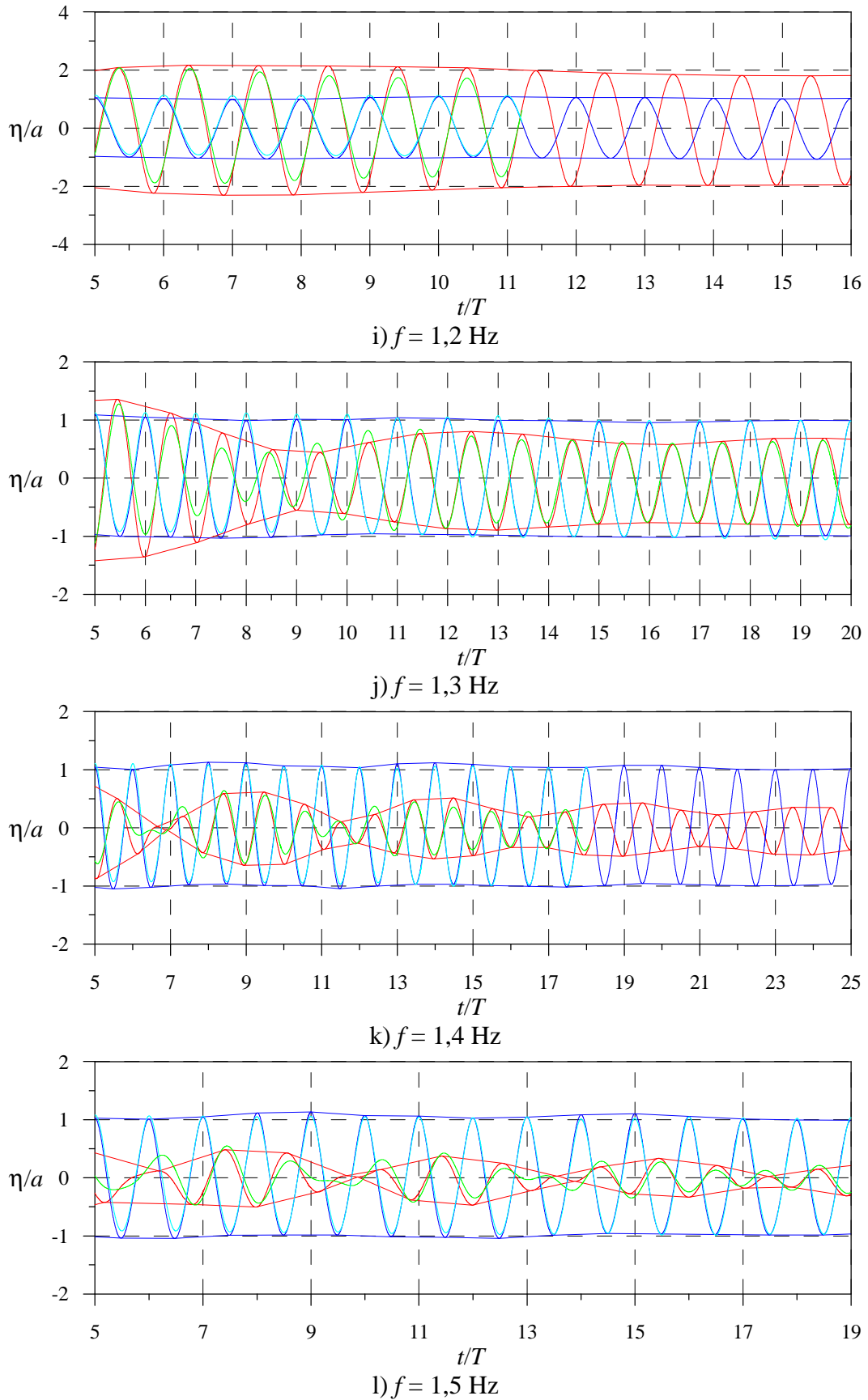


Figura 4 (Cont.). Comparação da evolução temporal da elevação da superfície livre, no interior e no exterior do cilindro, obtidas pelos dois códigos numéricos. FLUINCO (— sonda interior; — sonda exterior), FLUENT (— sonda interior; — sonda exterior).

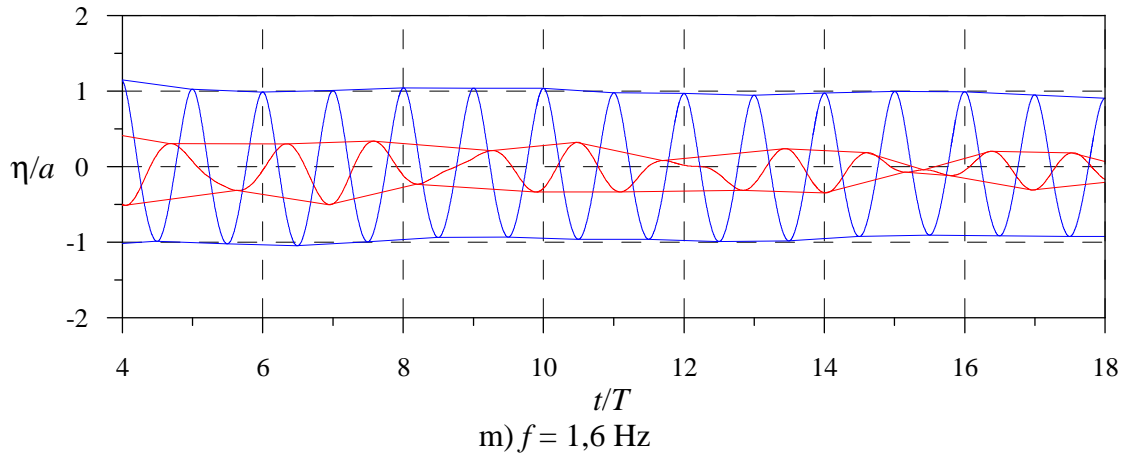


Figura 4 (Cont.). Comparação da evolução temporal da elevação da superfície livre, no interior e no exterior do cilindro, obtidas pelos dois códigos numéricos. FLUINCO (— sonda interior; - - - sonda exterior), FLUENT (— sonda interior; - - - sonda exterior).

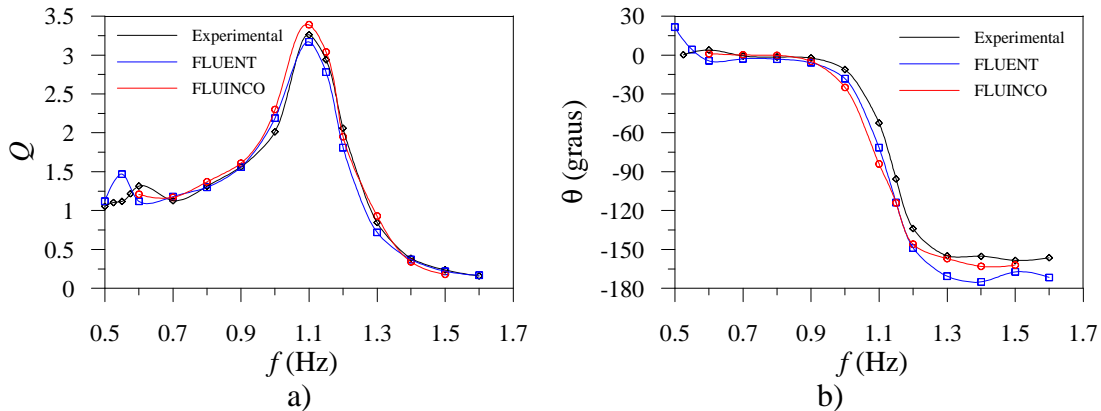


Figura 5. Factor de amplificação,  $Q$ , e ângulo de fase,  $\theta$ , da resposta em função da frequência da onda incidente.

No caso simulado, que corresponde a um modelo simplificado testado experimentalmente, foram simuladas as incidências de ondas monocromáticas de altura 0,015 m e diferentes frequências de 0,5 Hz a 1,6 Hz num canal de 0,4 m de profundidade e 0,70 m de largura sobre um cilindro vertical vazado submerso colocado no centro. O cilindro tem diâmetro interno de 0,05 m e espessura de 0,0025 m e a sua parte submersa está a 0,18 m da superfície livre em repouso.

Foi feita uma análise pormenorizada para o caso com frequência de 0,9 Hz, comparando as elevações dentro e fora do cilindro com os resultados experimentais, obtendo-se boa concordância. Constatou-se, nesse caso, que o escoamento sofre fortes perturbações em torno da extremidade submersa do cilindro, mas que se estabiliza a medida que se aproxima da superfície livre. Essa é a razão pela qual a superfície livre dentro do cilindro permanece praticamente plana e horizontal ao longo da simulação.

As outras simulações foram realizadas variando-se as frequências da onda, o que permitiu uma análise do factor de amplificação e do ângulo de fase entre as medições dentro e fora do cilindro. Os resultados numéricos mostraram um comportamento muito semelhante aos experimentais, onde foi observado um pico de elevação no interior do cilindro em torno da frequência de 1,1 Hz, também previsto pela análise teórica.

As análises feitas neste trabalho mostram os fenómenos que ocorrem nas interações entre um DAEO-CAO do tipo cilindro vertical e ondas monocromáticas, considerando as equações completas de Navier-Stokes, onde os efeitos de viscosidade são

contemplados. Embora os dois códigos numéricos utilizem técnicas numéricas distintas, volumes finitos e elementos finitos, captura de superfície livre (técnica VoF) e seguimento de superfície livre (condição de contorno cinemática da superfície livre), e as malhas de discretização utilizem elementos diferentes, tetraedros e hexaedros, obtêm-se resultados muito semelhantes.

As simulações foram feitas para o caso em que a superfície livre está submetida a uma pressão constante e igual à atmosférica. Num caso prático real existirá, no interior da câmara pneumática, um valor de pressão diferente da atmosférica exterior devido ao efeito da turbina. Para isso, em trabalhos futuros, serão realizadas simulações contemplado a referida influência.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento da FCT através do projecto PTDC-EME-MFE-66999-2006 e dos centros de investigação IDMEC e MARETEC. Os autores agradecem ainda a M.F.P. Lopes a cedência dos seus dados experimentais apresentados neste artigo.

## REFERÊNCIAS

1. BARREIRO T.; DIDIER E.; GIL L.; ALVES M.. Simulação numérica não linear do escoamento gerado pela interacção entre a agitação marítima e conversores pontuais de energia das ondas. In: III Conferência Nacional em Mecânica de Fluidos, Termodinâmica e Energia, Bragança, Portugal, 2009.
2. BARREIRO, T. G.; GIL, L. Energia das ondas marítimas: tecnologias e a experiência portuguesa. Anais do Clube Militar Naval, Vol. CXXXVIII, p. 403-422, 2008.
3. BRITO-MELO, A. Modelação e pré-dimensionamento de centrais de coluna de água oscilante: aplicação à central de energia das ondas do Pico, Açores. Lisboa, 2000. Tese (Doutoramento), Instituto Superior Técnico, École Centrale de Nantes.
4. CLÉMENT, A.; MCCULLEN, P.; FALCÃO, A. F. O.; FIORENTINO, A.; GARDNER, F.; HAMMARLUND, K.; LEMONIS, G.; LEWIS, T.; NIELSEN, K.; PETRONCINI, S.; PONTES, M. T.; SCHILD, P.; SJÖSTRÖM, B.-O.; SORENSEN, H. C.; THORPE, T. Wave Energy in Europe: Current Status and Perspectives, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 6, pp. 405-431, 2002.
5. DELAURÉ, Y. M. C.; LEWIS, A. 3D hydrodynamic modeling of fixed oscillating water column wave power plant by a boundary element methods. Ocean Engineering, Vol.30, p.309-330, 2003.
6. EVANS, D. V. The oscillating water column wave-energy device. Journal of the Institute of Mathematics and Applications. Vol. 22, p. 423-433, 1978.
7. EVANS, D. V. Wave-power absorption by systems of oscillating surface pressure distributions. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 114, p. 481-499, 1982.
8. EVANS D. V.; PORTER, R. Hydrodynamic characteristics of an oscillating water column device. Applied Ocean Research, Vol. 17, p. 115-164, 1996.
9. FALCÃO, A. F. O. The development of wave energy utilisation. International Energy Agency Implementing Agreement on Ocean Energy Systems, Annual Report, 2008.
10. FALCÃO, A. F. O.; SARMENTO, A. J. N. A. Wave generation by a periodic surface pressure and its application in wave-energy extraction. In: 15th Int. Cong. Theor. Appl. Mech. Toronto, 1980.

11. FALNES, J. Ocean waves and oscillating systems. Linear interactions including wave-energy extraction, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2002.
12. FALNES, J. A review of wave-energy extraction. *Marine Structures*, Vol 20, No 4, pp 185-201, 2007.
13. FLUENT 6.3 User's Guide, Fluent Inc., USA, 2006.
14. HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of fluid (VoF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comp. Phys.*, vol. 39, pp. 201-225, 1981.
15. JOHNS, B. The modeling of the free surface flow of water over topography. *Coastal Engineering*. Vol 15, p. 257-278, 1991.
16. LEE, C. H.; NEWMAN, J. N.; NIELSEN, F. G. Wave interactions with an oscillating water column. In: 6th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Los Angeles, ISOPE, I: 82-90, 1996.
17. LEMÉHAUTÉ, B. An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves, Springer-Verlag, 1976.
18. LOPES, M. F. P.; RICCI, P.; GATO, L. M. C.; FALCÃO, A. F. O. Experimental and numerical analysis of the oscillating water column inside a surface-piercing vertical cylinder in regular waves. In: 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, 2007.
19. MITTAL, S.; TEZDUYAR, T. E. Parallel finite element simulation of 3D incompressible flows— fluid–structure interaction. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. Vol 21, p. 933–953, 1995.
20. PONTES, M. T.; FALCÃO, A.F.O. Oceans Energies: Resources and Utilization. In: 18th World Energy Conference, Buenos Aires, 2001.
21. PAIXÃO CONDE, J. M.; DIDIER, E. Simulação numérica de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante. In: 9º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica – CIBIM9 (Las Palmas de Gran Canaria, España), 2009.
22. PAIXÃO CONDE J. M.; GATO, L. M. C. Numerical study of the air-flow in an oscillating water column wave energy converter, *Renewable Energy*, vol. 33, issue 12, pp. 2637-2644, 2008.
23. PANICKER, N. N. Power resource estimate of ocean surface waves, *Ocean Engineering*, vol. 3, no. 6, pp. 429-439, 1976.
24. PERIC, M.; FERZIGER, J. H. *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, Second edition, 1997.
25. RAMASWAMY, R.; KAWAHARA, M. Arbitrary lagrangian-eulerian finite element method for unsteady, convective, incompressible viscous free surface fluid flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. Vol. 7, pp. 1053-1075, 1987.
26. TEIXEIRA, P. R. F. Simulação numérica da interação de escoamentos tridimensionais de fluidos compressíveis e incompressíveis e estruturas deformáveis usando o método de elementos finitos. Porto Alegre, 2001. Tese de doutorado, PPGEC-UFRGS.
27. TEIXEIRA, P. R. F.; AWRUCH, A. M. Numerical simulation of three dimensional incompressible flows using the finite element method. In: ENCIT, n. 8, Porto Alegre, 2000.
28. TEIXEIRA, P. R. F.; DIDIER E.; PAIXÃO CONDE, J. M. Análise numérica de um equipamento de energia das ondas do tipo OWC. In: Actas 6as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Funchal, Portugal, 2009.
29. WAMIT manual V.6.2 PC, 2004, [www.wamit.com](http://www.wamit.com).