



## VII SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, de 23 à 25 de Novembro de 2016

### SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE NO INTERIOR DE UM CILINDRO VERTICAL SUJEITO A ONDAS REGULARES UTILIZANDO O CÓDIGO IHFOAM

J. M. P. Conde, J. M. S. M. Cardoso

UNIDEMI, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia,  
Campus de Caparica, 2829-516 Monte de Caparica, Portugal  
e-mails: jpc@fct.unl.pt, jm.cardoso@campus.fct.unl.pt

#### RESUMO

*O movimento da superfície livre no interior de um tubo cilíndrico vertical pode ser visto como uma aproximação simplificada de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas do oceano do tipo coluna de água oscilante (DAEO-CAO). No presente trabalho é aplicado o código IHFOAM, que resolve as equações de Navier-Stokes por um método de volumes finitos utilizando a técnica VoF (Volume of Fluid), para simular a ação de uma onda regular sobre um cilindro vertical aberto para a atmosfera. Neste artigo comparam-se os resultados obtidos pelo IHFOAM com outros resultados numéricos e com dados experimentais, constatando-se uma boa correspondência entre estes resultados. Deste modo o código IHFOAM foi verificado (ao ser comparado com outros resultados numéricos) e validado (ao ser comparado com os resultados experimentais).*

#### 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 atual de energia no mundo (Falnes, 2007; Panicker, 1976). 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 elétrica a nível mundial.

Apesar de já ter sido proposta uma grande variedade de sistemas de conversão de energia das ondas, com base em vários métodos de extração desta energia, apenas alguns protótipos reais foram construídos e instalados em águas costeiras expostas e ligados à rede elétrica (Falcão, 2010).

O sistema de coluna de água oscilante (CAO) é considerado um dos tipos de dispositivo de aproveitamento da energia das ondas (DAEO) do oceano tecnicamente mais conhecido, em virtude do grande esforço de investigação de que foi objeto nos últimos anos. Este DAEO foi um dos primeiros a ser testado, em fase de protótipo, em condições reais de funcionamento. 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 diretamente acoplada ao gerador elétrico (Falnes, 2002).

A grande maioria dos primeiros protótipos foi instalada na costa ou em quebra-mares, em diferentes partes do mundo (Toftstalen, Noruega, 1985; Sakata, Japão, 1988; Trivandrum, Índia, 1990; Pico, Portugal, 1999; Limpet, Escócia, 2000; Port Kembla, Austrália, 2005; Mutriku, Espanha, 2011). Embora os sistemas costeiros tenham as vantagens da facilidade de acesso e da ausência de amarrações, nesse caso a energia incidente é menor, quando 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 (Clément et al., 2002).

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 elétrica no alternador. Não é prática corrente a utilização de um único código numérico para simular a totalidade dos efeitos hidrodinâmicos e aerodinâmicos 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 correta simulação destes escoamentos é fundamental para avaliar o desenho da câmara pneumática e para a determinação das condições de funcionamento da turbina (Conde e Gato, 2008). Os códigos numéricos que resolvem as equações RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*) permitem simular todos estes efeitos.

Um DAEO-CAO com a forma de um tubo vertical, com diâmetro pequeno quando comparado com o comprimento da onda incidente, pode ser considerado um absorvedor pontual. Este tipo de dispositivo já foi estudado analiticamente e experimentalmente por muitos autores. Por exemplo, Evans (1978) 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 (*Power Take-off*, PTO) é simulado por um sistema linear massa-mola-amortecedor. Falcão e Sarmento (1980) e Evans (1982) consideram uma superfície oscilante com distribuição de pressão uniforme. Outros autores usaram códigos baseados no método dos elementos de fronteira (BEM - *Boundary Element Method*), destacando-se os trabalhos de Lee et al. (1996), Brito e Melo (2000), Delauré e Lewis (2003) e Lopes et al. (2007, 2009).

O objetivo deste trabalho consiste na aplicação do código IHFOAM e comparar os resultados obtidos com os de outros códigos que resolvem as equações RANS (Conde et al., 2011) e experimentais (Lopes et al., 2007).

## 2. CÓDIGO IHFOAM

O OpenFOAM<sup>®</sup> é uma biblioteca, em linguagem de programação C++, que dispõe e permite criar aplicações que se dividem em duas categorias: *Solvers*, que são desenvolvidos para resolver um problema específico e *Utilities*, que são concebidos para executar tarefas que envolvem a manipulação e processamento de dados (OpenFOAM, 2013).

O *solver* IHFOAM é baseado no *solver* InterFoam que permite resolver problemas bifásicos, com geração de ondas, absorção ativa de ondas e possibilidade de simular meio poroso. O IHFOAM resolve as equações VARANS (*Volume Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes*) para dois fluidos incompressíveis e imiscíveis com zona porosa, por um método de volumes finitos. Em simulações sem zona porosa resolve apenas as equações RANS. A superfície livre é identificada pelo método *Volume of Fluid* (VoF) e permite ainda a introdução de vários modelos de turbulência: k- $\epsilon$ , k- $\omega$  SST (*Shear Stress Transport*) e LES (*Large eddy simulation*) (IHFOAM, 2014, Higuera et al., 2013).

O IHFOAM permite a geração de ondas regulares e irregulares de acordo com várias teorias de ondas: Stokes de primeira, segunda e de quinta ordem; cnoidal; função de corrente; ondas solitárias; ondas irregulares; e gerador de ondas do tipo pistão. Todas as teorias de ondas usadas pelo IHFOAM introduzem um perfil não uniforme na fronteira do domínio, sendo geradores estáticos, ou seja, é aplicada uma velocidade horizontal e vertical à água, com exceção do gerador de ondas do tipo pistão que introduz um perfil de velocidade uniforme. Este *solver* utiliza absorção ativa para impedir que as ondas refletidas em estruturas ou nos limites do domínio computacional influenciem a onda gerada na fronteira de geração.

O IHFOAM utiliza o mesmo tratamento da superfície livre que o InterFoam, usando o método VoF. Este método utiliza uma variável, a fração de volume, que varia entre 1 e 0 consoante a quantidade existente de água na célula, 1 se for somente água, 0 se for o ar e entre 1 e 0 se for a interface entre ar e água. Para obter uma interface bem definida, foi desenvolvido o método limitador multidimensional universal para solução explícita (*Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution*, MULES). Na resolução do sistema de equações RANS é utilizado o algoritmo PIMPLE, que é uma combinação dos algoritmos SIMPLE (*semi-implicit method for pressure-linked equations*) e PISO (*pressure implicit with splitting of operators*).

### 3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Neste artigo reproduz-se numericamente um dos ensaios experimentais descritos por Lopes et al. (2007). A Fig. 1a mostra um desses ensaios realizados com protótipo no canal de testes do Departamento de Arquitetura 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 (Fig. 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, respetivamente. A profundidade da água em repouso,  $D$ , e a amplitude das ondas,  $a$ , são iguais a 0,4 m e 0,015 m, respetivamente.

No estudo experimental foram considerados: diferentes comprimentos submersos,  $s$ , respetivamente, 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 ou com a imposição de uma perda de carga. O efeito dissipativo de um DAEO-CAO foi modelado experimentalmente usando uma membrana têxtil porosa colocada na extremidade superior do cilindro vertical. Esta membrana porosa permite simular a perda de carga devida a uma turbina do tipo Wells instalada num dispositivo real e avaliar a resposta do dispositivo numa configuração semelhante a um protótipo.

Embora a razão do 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 atuam como planos de simetria.

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 ( $0,5 > D/L > 0,05$ ).

No presente trabalho considerou-se apenas o comprimento submerso igual a 0,18 m e a frequência de 0,9 Hz ( $T = 1,111$  s e  $L = 1,728$  m) sem perda de carga, ou seja com a extremidade superior do cilindro aberta para a atmosfera.

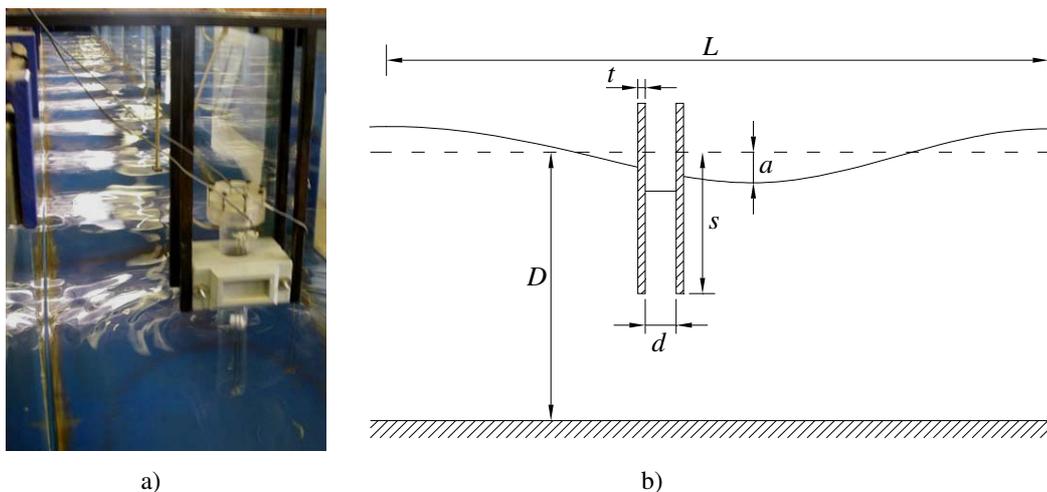


Figura 1. a) Ensaios em modelo físico (Lopes et al., 2007); b) Esquema do problema.

Tendo por objetivo efetuar uma comparação com os resultados obtidos por outros códigos numéricos (Conde et al., 2011), a malha computacional utilizada foi a mesma que foi utilizada por estes autores com o código FLUENT®. Aproveitando a simetria do problema em relação ao plano longitudinal e vertical, o domínio é apenas metade do domínio real ( $0 \leq y \leq 0,35$  m). 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 2 m no sentido do gerador de ondas ( $x/L = -1,163$ ) e até 6,5 m no sentido oposto ( $x/L = 3,78$ ). Na direção vertical o domínio está compreendido entre  $-0,4$  m  $\leq z \leq 0,07$  m e o cilindro prolonga-se desde  $z = -0,18$  m (na água) até à fronteira superior (no ar). A malha de discretização é composta aproximadamente por  $4,7 \times 10^5$  volumes de controlo, sendo mais refinada nas proximidades do cilindro (Fig. 2). O perímetro da semi-circunferência do cilindro é discretizado por 40 segmentos. Na região de propagação das ondas,  $-0,02$  m  $\leq z \leq 0,02$  m, a discretização é composta de 24 segmentos iguais, ou seja, 18 segmentos por altura de onda.

Desde  $x = -2$  m até  $x = 1,5$  m utilizam-se aproximadamente 60 segmentos por comprimento de onda. Desde  $x = 1,5$  m até  $6,5$  m o comprimento dos segmentos é progressivamente aumentado até atingir  $0,61$  m ( $\sim 0,35L$ ) no segmento adjacente à parede direita.

Na simulação apresentada foi utilizada a versão 2.2.2 do OpenFOAM® no sistema operativo Ubuntu 14.04LTS. Foi utilizado nas simulações um computador com um processador Intel® Core™ i7 950 @ 3.07GHz com 8GB RAM.

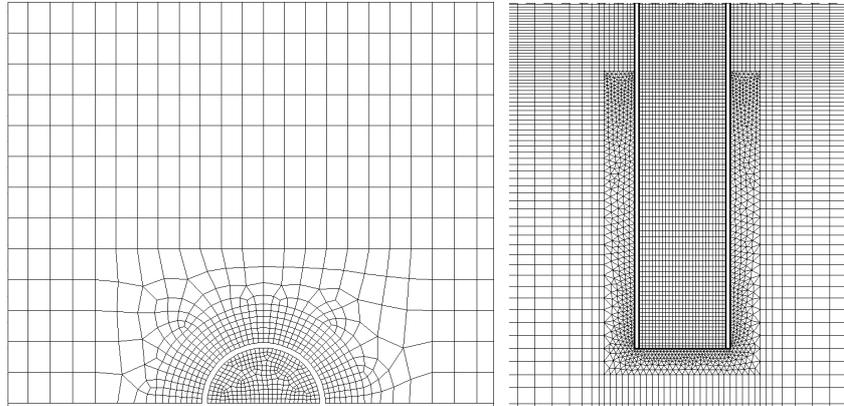


Figura 2. Pormenores da malha de discretização.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 3 apresenta a evolução temporal da elevação da superfície livre,  $\eta$ , em duas sondas colocadas no plano transversal coincidente com o eixo do cilindro, uma está localizada no eixo do cilindro e outra no exterior numa posição intermédia entre a parede do canal e a do cilindro.

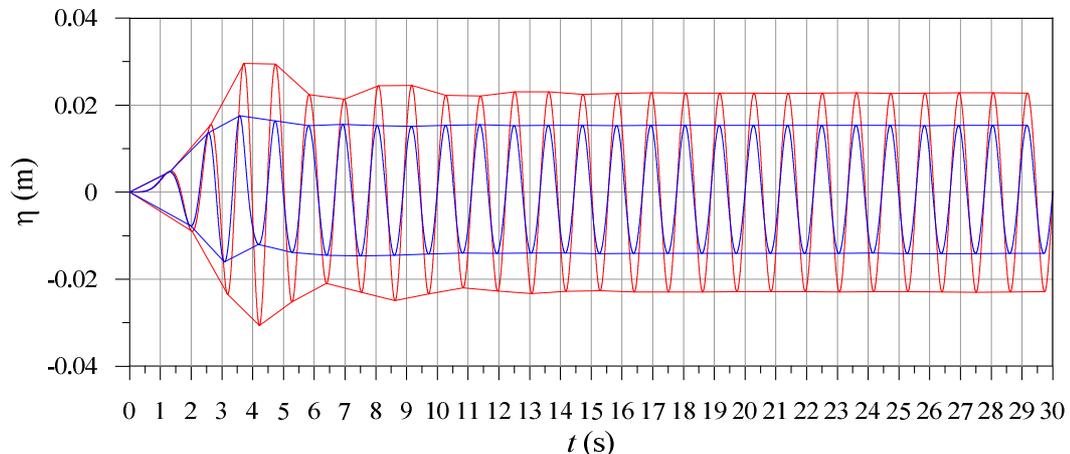


Figura 3. Evolução temporal da elevação da superfície livre no interior (—) e no exterior do cilindro (—).

A partir dos resultados apresentados na Fig. 3 é possível estimar o fator de amplificação, razão entre as elevações máximas dentro e fora do cilindro (Fig. 4), e o desfaseamento entre as ondas verificadas no interior e exterior do cilindro (Fig. 5).

Pela observação das Figuras 3, 4 e 5 constata-se que é necessário decorrer aproximadamente 15 períodos de onda para que a evolução da superfície livre, medida nas duas sondas, estabilize.

Os resultados obtidos após a estabilização, para o fator de amplificação e para o ângulo de fase são respetivamente,  $1,56$  e  $-6,46^\circ$ . Os resultados obtidos por Conde et al. (2011) são, respetivamente: para o código FLUENT®,  $1,56$  e  $-5,85^\circ$ ; e para o código FLUINCO,  $1,61$  e  $-4,8^\circ$ . Os resultados experimentais obtidos por Lopes et al. (2007) são respetivamente,  $1,56$  e  $-2,21^\circ$ . Os valores do coeficiente de amplificação são iguais, com exceção do código FLUINCO cujo valor é ligeiramente diferente, o que pode ser atribuído à malha/método numérico diferente.

O desfasamento apresenta maiores diferenças, que podem estar relacionadas com a maior sensibilidade no cálculo desta variável às ligeiras diferenças nas ondas medidas, que por sua vez podem depender dos métodos numéricos de cálculo e dos métodos de dissipação/absorção das ondas, quer nos códigos numéricos quer nos ensaios experimentais.

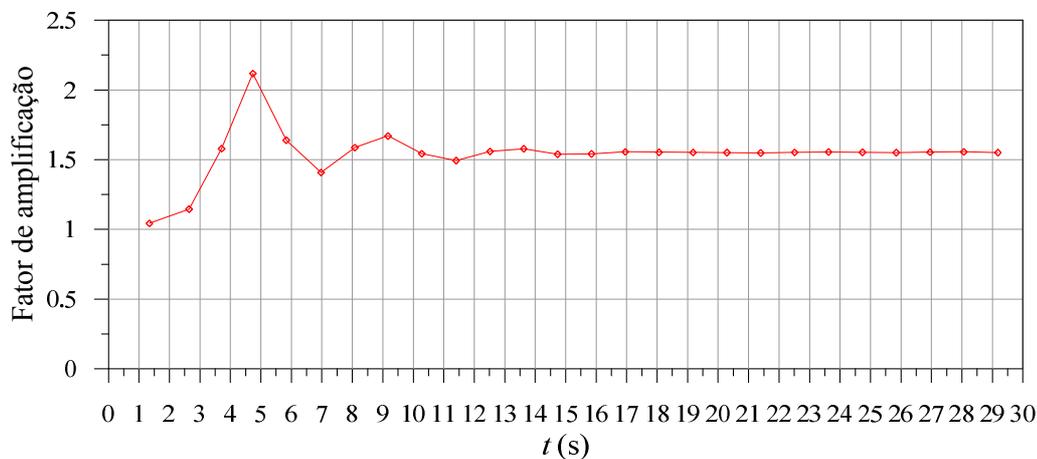


Figura 4. Evolução temporal do fator de amplificação.

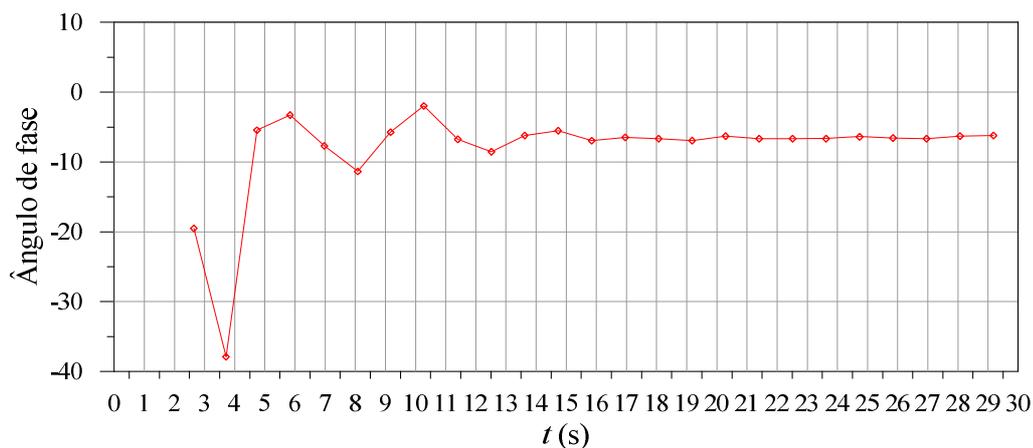


Figura 5. Evolução temporal do desfasamento.

Na Fig. 6 comparam-se as evoluções temporais da elevação da superfície livre, no interior e no exterior do cilindro, obtidas pelos três códigos numéricos (IHFOAM, FLUENT® e FLUINCO), com os correspondentes dados experimentais. Observa-se que os resultados numéricos têm boa concordância entre si e com os dados experimentais. Esta figura confirma os resultados obtidos para o fator de amplificação que são quase iguais para os casos comparados. As diferenças verificadas para o ângulo de fase são mais difíceis de identificar graficamente pela Fig. 6.

Na Fig. 7 representam-se a deformação da superfície livre e o módulo da velocidade em 8 instantes num período após a estabilização da solução. Constata-se que existem fortes gradientes de velocidade e assimetria no escoamento nas imediações na abertura inferior do cilindro. Apesar deste efeito, verifica-se uma uniformização do escoamento no sentido da superfície livre, o que contribui para a forma plana que esta adquire ao longo de todo o período. Esse comportamento foi também constatado por Lopes et al. (2007) e Conde et al. (2011) para esta frequência.

## 5. CONCLUSÕES

Neste artigo apresentou-se a simulação numérica da coluna de água oscilante no interior de um cilindro vertical sujeito a ondas regulares utilizando o código IHFOAM. Esta geometria corresponde a uma simplificação de um DAEO-CAO.

Foram comparados os resultados obtidos com o IHFOAM com os obtidos pela aplicação de outros dois códigos numéricos e com resultados experimentais. Um dos códigos (FLUINCO) é baseado na técnica dos elementos finitos e o outro (FLUENT®) na técnica dos volumes finitos. Foi simulada a incidência de ondas monocromáticas de altura 0,015 m e frequências de 0,9 Hz num canal de 0,4 m de profundidade e 0,70 m de largura sobre um cilindro vertical vazado submerso colocado no eixo longitudinal do canal. O cilindro tem diâmetro interno de 0,05 m e espessura de 0,0025 m e a sua parte submersa estava a 0,18 m da superfície livre em repouso.

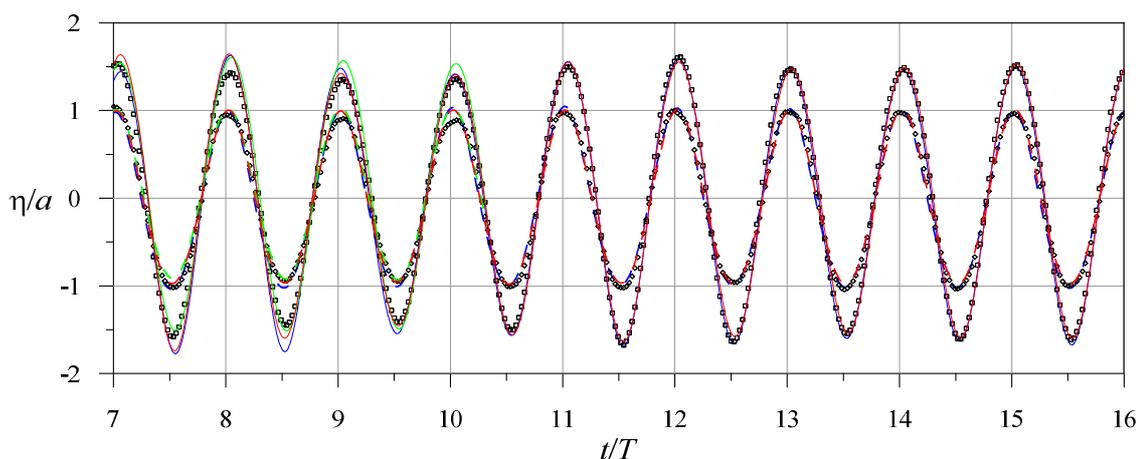


Figura 6. Comparação da evolução temporal da elevação da superfície livre, no interior e no exterior do cilindro, obtidas pelos três códigos numéricos, com os correspondentes dados experimentais: IHFOAM (- - - sonda interior; — sonda exterior), FLUENT® (- - - sonda interior; — sonda exterior), FLUINCO (- - - sonda interior; — sonda exterior), e experimental ( $\diamond$  sonda interior;  $\square$  sonda exterior)

Foram comparadas as elevações dentro e fora do cilindro, obtendo-se boa concordância entre os resultados numéricos e os experimentais. Constatou-se que o escoamento sofre fortes perturbações assimétricas 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 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 três 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. Deste modo o código IHFOAM foi verificado (ao ser comparado com outros resultados numéricos) e validado (ao ser comparado com os resultados experimentais). Assim, o modelo numérico proposto está habilitado para ser utilizado em estudos computacionais do conversor CAO.

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.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através dos projetos POCI/EME/59024/2004 e PTDC/EME-MFE/66999/2006.

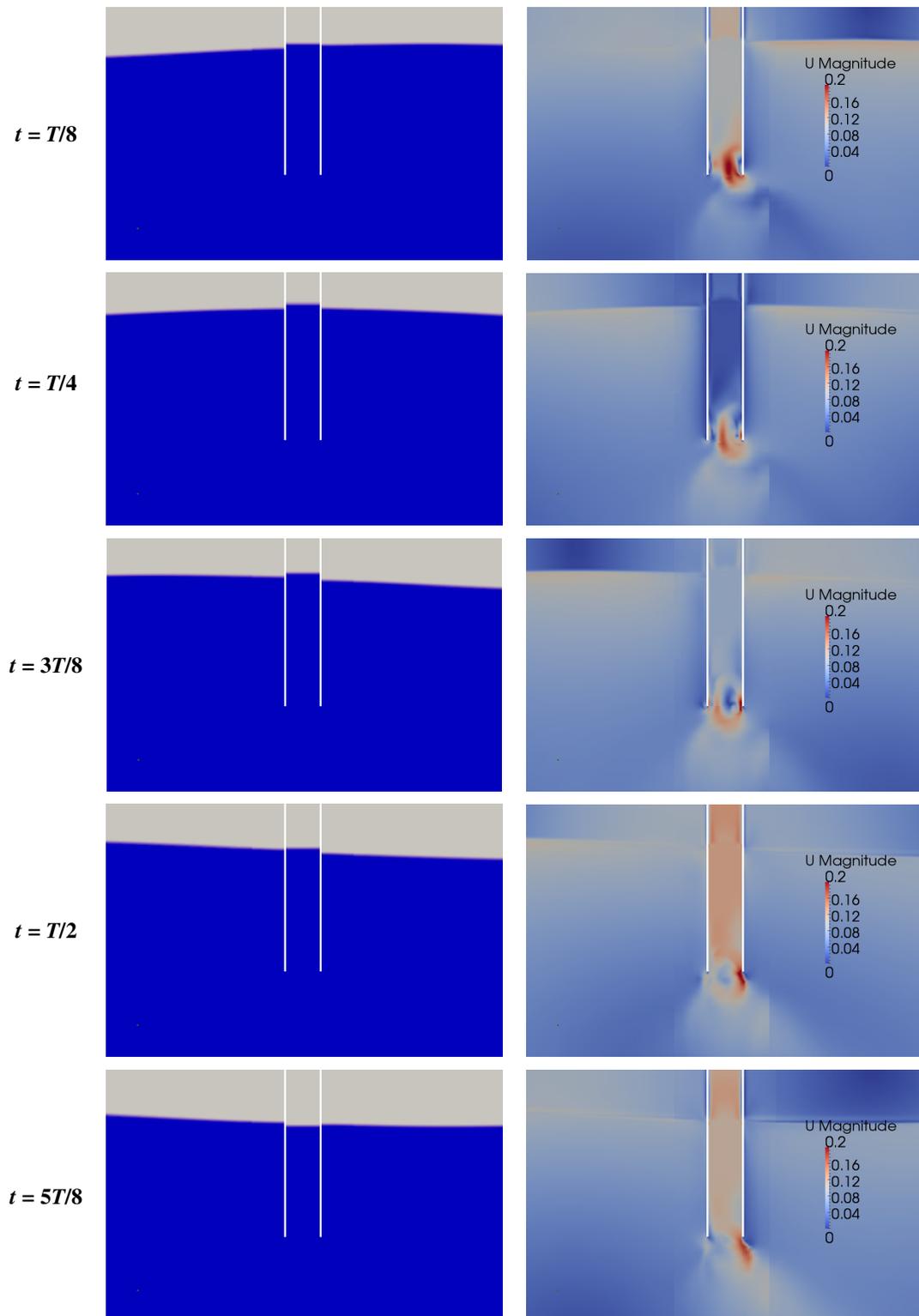


Figura 7. Deformação da superfície livre e módulo da velocidade (m/s) para oito instantes num período.

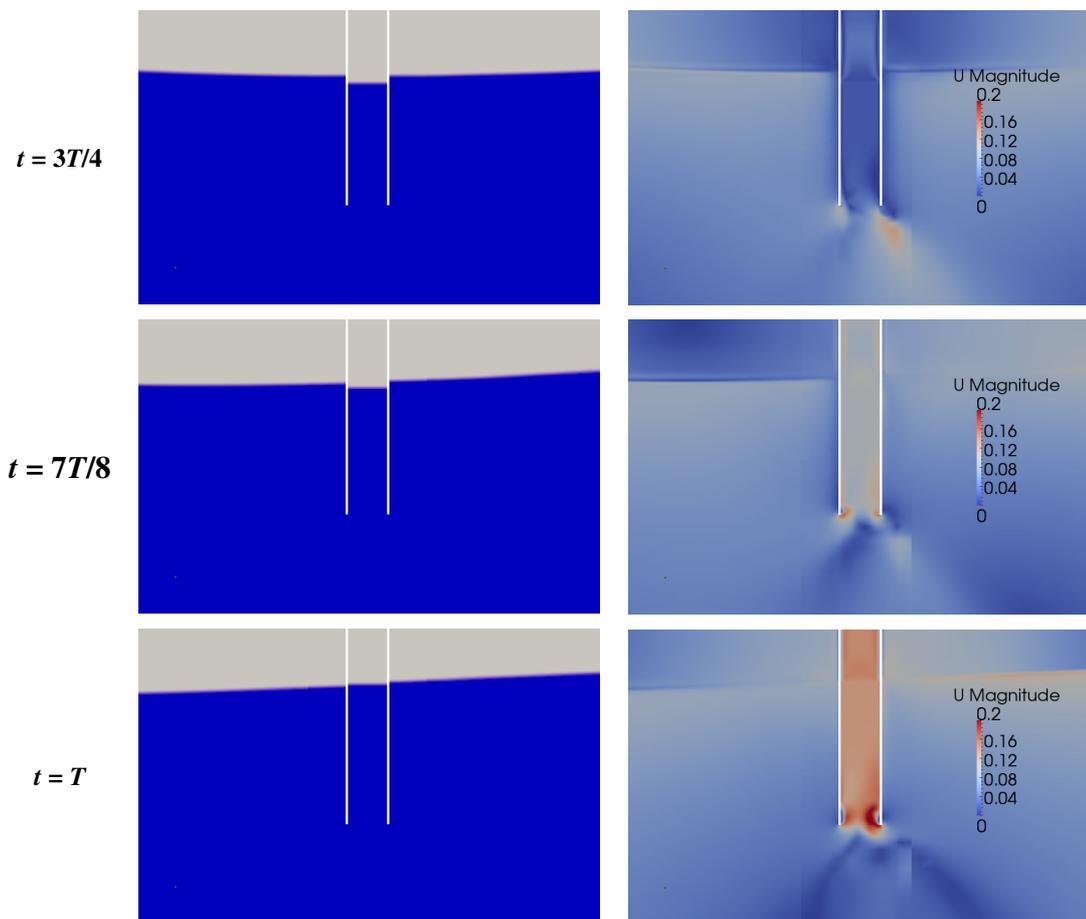


Figura 7. Deformação da superfície livre e módulo da velocidade (m/s) para oito instantes num período (cont.).

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brito-Melo, A., 2000. Modelação e pré-dimensionamento de centrais de coluna de água oscilante: aplicação à central de energia das ondas do Pico, Açores. Tese Doutoramento, Instituto Superior Técnico (Lisboa, Portugal)/École Centrale de Nantes (France).
- 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., and Thorpe, T., 2002. "Wave Energy in Europe: Current Status and Perspectives". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 6, pp. 405-431.
- Conde, J.M.P., Teixeira, P.R.F., Didier, E., 2011. "Numerical Simulation of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter: Comparison of two Numerical Codes". In *Proc. 21st Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, Maui, Hawaii, USA*, pp. 668-674.
- Conde, J.M.P., Gato, L.M.C., 2008. "Numerical study of the air-flow in an oscillating water column wave energy converter". *Renewable Energy*, Vol. 33, No 12, pp. 2637-2644.
- Delauré, Y. M. C. and Lewis, A., 2003. "3D hydrodynamic modeling of fixed oscillating water column wave power plant by a boundary element methods", *Ocean Engineering*, Vol. 30, pp 309-330.
- Evans, D.V., 1978. "The oscillating water column wave-energy device". *Journal of the Institute of Mathematics and Applications*, Vol. 22, pp. 423-433.
- Evans, D.V., 1982. "Wave-power absorption by systems of oscillating surface pressure distributions". *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 114, pp. 481-499.
- Falcão, A. F. O., 2010. "Wave energy utilization: A review of the technologies". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, pp. 899-918.

- Falcão, A.F.O., Sarmiento, A.J.N.A., 1980. "Wave generation by a periodic surface pressure and its application in wave-energy extraction". In Proc. 15th Int. Cong. Theor. Appl. Mech., Toronto, Canada.
- Falnes, J., 2002. Ocean waves and oscillating systems. Linear interactions including wave-energy extraction. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Falnes, J., 2007. "A review of wave-energy extraction". Marine Structures, Vol. 20, N. 4, pp. 185-201.
- Higuera, P.C., Lara, J.L., Losada, I.J., 2013. "Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models: application to OpenFOAM". Coastal Engineering, Vol. 71, pp.102-118.
- IHFOAM, 2014. IHFOAM Manual, IHCantabria.
- Lee, C.H., Newman, J.N., Nielsen, F.G., 1996. "Wave interactions with an oscillating water column", In Proc. 6th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, Los Angeles, Vol 1, pp 82-90.
- Lopes, M.F.P., Ricci, P., Gato, L.M.C., Falcão, A.F.O., 2007. "Experimental and numerical analysis of the oscillating water column inside a surface-piercing vertical cylinder in regular waves". In Proc. 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Portugal.
- Lopes, M. F. P., Hals, J., Gomes, R. P. F., Moan, T., Gato, L. M. C., Falcão, A. F. de O., 2009. "Experimental and numerical investigation of non-predictive phase-control strategies for a point-absorbing wave energy converter", Ocean Engineering, Vol. 36, pp. 386-402.
- OpenFOAM, 2013. The Open Source CFD Tollbox – User Guide v.2.2.2. OpenCFD.
- Panicker, N.N., 1976. "Power resource estimate of ocean surface waves", Ocean Engineering, Vol. 3, N. 6, pp. 429-439.

## **8. AVISO DE RESPONSABILIDADE**

Os autores são os únicos responsáveis pelo material apresentado neste artigo.