

## Simulação numérica 3D de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas de tipo coluna de água oscilante localizado na costa

Eric Didier<sup>1,2,3</sup>, Luis M. Gil<sup>2,3</sup>, Paulo R.F. Teixeira<sup>4</sup>, Djavan P. Davyt<sup>4</sup>, Rubén Ramalhais<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente,  
Av. do Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal  
email: lmg@fct.unl.pt; http://www.fct.unl.pt

<sup>2</sup> Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia,  
2829-516, Monte de Caparica, Portugal

<sup>3</sup> MARETEC, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico,  
Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal

<sup>4</sup> Universidade Federal do Rio Grande,  
Av. Itália, km 8, Campus Carreiros, 96201-900, Rio Grande, RS, Brasil

---

### Sumário

*Neste trabalho é analisado um dispositivo de aproveitamento de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante (CAO), sob a acção de ondas regulares de diferentes períodos, localizado na extremidade de um canal numérico tridimensional de onda. O dispositivo é constituído por uma câmara-de-ar e por uma conduta onde é modelada uma turbina (ou mais especificamente o efeito dissipativo induzido por uma turbina). São utilizados dois modelos numéricos, FLUENT e FLUINCO, que permitem resolver as equações totalmente não lineares de Navier-Stokes-Reynolds em valor médio - RANS - com superfície livre. Um dos códigos (FLUINCO) é baseado na técnica dos elementos finitos e o outro (FLUENT) na de volumes finitos. O FLUENT usa a metodologia VoF (Volume of Fluid) para a modelação do escoamento da água e do ar simultaneamente. A perda de carga, devido à presença de uma turbina com curva característica linear (tipo turbina de Wells) é considerada através de uma função linear dependente do caudal de ar na saída da conduta. O FLUINCO usa uma descrição Arbitrária Lagrangeana Euleriana (ALE) para modelar o escoamento da água, onde a superfície livre é definida pela solução da equação da elevação da superfície a cada passo de tempo. Neste programa, a pressão sobre a superfície da água dentro da câmara é imposta através de um modelo aerodinâmico baseado na equação de conservação de energia, considerando a compressibilidade do ar, uma transformação iso-entrópica e uma relação linear entre o caudal de ar e a perda de carga causada pela turbina Wells. O desempenho do dispositivo é analisado para várias configurações geométricas e características de onda incidente através do factor de amplificação, do ângulo de fase e da potência pneumática.*

---

**Palavras-chave:** Energia das ondas; Coluna de água oscilante; Simulação numérica; FLUENT; FLUINCO.

## 1 INTRODUÇÃO

A potencial utilização em grande escala da energia das ondas oceânicas teria a capacidade de cobrir uma parcela considerável do consumo de energia eléctrica 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 extracção, apenas alguns protótipos foram construídos e instalados em águas costeiras.

O estudo de dispositivos de Coluna de Água Oscilante (CAO) iniciou-se por volta de 1940, com Yoshio Masuda, que é considerado o pai das tecnologias de conversão de energia das ondas [1]. No entanto, o interesse pelas energias renováveis apenas se tornou mais efectivo com a crise petrolífera em 1973, altura em que se começou a pensar na produção de energia marítima em larga escala. Surgem, nessa altura, as primeiras patentes e os primeiros protótipos [2].

O sistema de coluna de água oscilante (CAO) é 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 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 pelas turbinas que estão directamente acopladas aos geradores eléctricos. Existem já diversos protótipos de dispositivos de coluna de água oscilante à escala real, com potências instaladas que variam entre

60kW e 500kW, e com a área da secção transversal entre 80 e 250m<sup>2</sup> [2, 3]: Tofestallen na Noruega (potência de 500kW), Sakata no Japão (potência de 60kW), Vizhinjam na Índia (potência de 150kW), Pico, Açores no Portugal (potência de 400kW), Limpet, Escócia no Reino Unido (potência de 500kW), Mutriku, País Basco na Espanha (potência de 300kW).

Nas últimas décadas o desenvolvimento dos meios computacionais permitiu obter soluções aproximadas das equações matemáticas que descrevem o escoamento no interior deste tipo de dispositivos. Estes modelos complementam os estudos em modelo físico, pois permitem recolher informações detalhadas sobre o escoamento e assim determinar correctamente as suas características ao redor e sobre a estrutura; possibilitam ainda, estabelecer parâmetros relacionados quer com a funcionalidade da estrutura (galgamento, potência pneumática, agitação dentro da CAO) quer relacionados com a sua estabilidade (forças na estrutura).

Têm sido realizados diversos estudos recorrendo a modelos numéricos totalmente não lineares, baseados nas equações de Navier-Stokes, ou em formulações potenciais (BEM – *Boundary Element Method*). Brito e Melo [4], Wang et al. [5], Delauré e Lewis [6], Alves e Sarmiento [7], El Marjani et al. [8], Lopes et al. [9], Josset e Clement [10], Hong et al. [11], Horko [12], Paixão Conde e Gato [13], Liu et al. [14, 15], Davyt et al. [16] realizaram estudos de optimização geométrica de dispositivos localizados na costa em 2D e 3D. Em Barreiro et al. [17] e Barreiro [18] é investigado numericamente um dispositivo de absorção pontual ao largo e Teixeira et al. [19] e Paixão Conde et al. [20] simulam um dispositivo experimental de Coluna de Água Oscilante (CAO) offshore em 3D.

No entanto, é de salientar que a maioria dos estudos numéricos de dispositivos localizados na costa foram realizados com modelos bidimensionais, Wang et al. [5], Hong et al. [11] e Alves e Sarmiento [7]. Nos estudos em 3D de El Marjani et al. [8] e em Paixão Conde e Gato [13] é imposta a velocidade da superfície livre na CAO, sendo que o primeiro introduz um meio poroso para simular a perda de carga imposta por uma turbina, o que é uma opção pouco versátil quando se pretende seleccionar diferentes tipos de turbinas. Por outro lado em Liu et al. [14, 15] e Horko [12] a propagação de onda no canal é feita por um batedor numérico onde se impõe um perfil de velocidades. Quando se analisam os dois estudos numéricos tridimensionais realizados por Liu et al. [14, 15] verifica-se que, no primeiro, os autores utilizam uma malha pouco refinada, particularmente na zona de movimento da superfície livre, e elementos muito irregulares na zona de conexão da conduta. No segundo estudo, os autores integram um modelo de turbina original, onde a perda de carga característica é feita com a redução de secção de uma conduta. Esta metodologia implica a criação de uma nova malha e a calibração da área da secção para um novo modelo de turbina. Nos trabalhos numéricos realizados por Horko [12], existe a tentativa de introduzir uma perda de carga no escoamento, não sendo realista a geometria apresentada, pois corresponde apenas a uma abertura estreita, da largura da câmara da CAO, no topo do dispositivo. A malha não estruturada nas proximidades desta abertura é muito distorcida e os elementos são exageradamente estirados.

O presente artigo apresenta a modelação numérica de um dispositivo de tipo CAO localizado na extremidade de um canal numérico de onda tridimensional. É importante salientar que a modelação numérica deve ser realizada recorrendo a um modelo tridimensional devido à geometria do dispositivo, aos fenómenos físicos que ocorrem na câmara, particularmente entre a câmara e a conduta de escoamento do ar, e à grande diferença da área da câmara e da secção da conduta. Dois modelos numéricos são utilizados: FLUENT, que resolve as equações de Navier-Stokes e utiliza a técnica VoF (*Volume of Fluid*) para a determinação da superfície livre, e FLUINCO, que utiliza o método de elementos finitos para resolver as equações de Navier-Stokes e considera a superfície livre da água como uma fronteira onde é aplicada a pressão atmosférica. Os dois modelos numéricos resolvem as equações totalmente não lineares de Navier-Stokes-Reynolds em valor médio - RANS - com superfície livre, já tendo sido validados com dados experimentais obtidos por modelação física, em canal de onda, correspondentes a um modelo simples de um dispositivo de aproveitamento de energia das ondas de tipo CAO offshore por Teixeira et al. 2009 [19], Paixão Conde et al. [20], e Didier et al. [21]. Duas configurações são modeladas no presente estudo, comparando sempre os resultados dos dois modelos FLUENT e FLUINCO: na primeira configuração, a câmara da CAO é totalmente aberta na parte superior e na segunda a câmara da CAO é fechada com uma conduta na qual é modelada uma turbina de tipo *Wells*. Analisam-se, para as duas configurações, o factor de amplificação na CAO, a pressão na câmara da CAO, o caudal na conduta e a potência pneumática em função do período de onda.

## 2 MODELO DO DISPOSITIVO CAO

O dispositivo de CAO é estudado para duas configurações:

- A câmara-de-ar do dispositivo está totalmente aberta estando assim à pressão atmosférica.
- A câmara-de-ar está fechada e modela-se o efeito dissipativo de uma turbina de tipo *Wells* instalada na conduta de ar do dispositivo.

Na primeira configuração, são considerados dois comprimentos para a câmara pneumática,  $L_{cao}$ , 5.0 e 10.0m. A parede frontal tem uma imersão de 5.0m e uma espessura de 0.5m. O canal de propagação das ondas tem fundo

horizontal com uma profundidade de água,  $h$ , de 10m, e uma largura constante de 8.0m. O canal tem um comprimento de cinco vezes o comprimento de onda. A Figura 1 apresenta um esquema do canal de onda numérico e do dispositivo de tipo CAO, assim como as diversas dimensões e a posição das sondas de elevação de superfície livre. Cinco sondas estão localizadas ao longo do canal (sonda 0 até 4) e cinco na câmara do dispositivo (sonda 5 até 9). O batedor está localizado no lado esquerdo do canal.

Na segunda configuração (Figura 2), a câmara pneumática está fechada e tem uma secção rectangular de 5.0m de comprimento por 8.0m de largura e uma altura de 20m do fundo até o topo. A conduta circular situada perto do topo de câmara-de-ar (eixo a uma distância de 1.5m do tecto) tem um diâmetro de 1.0m.

A onda regular tem uma altura,  $H$ , de 1.0m e o período,  $T$ , varia de 5s até 15s. O comprimento de onda,  $L$ , varia de 37.6m até 174.6m, ou seja 3.7 até 17.5 vezes o comprimento da CAO.

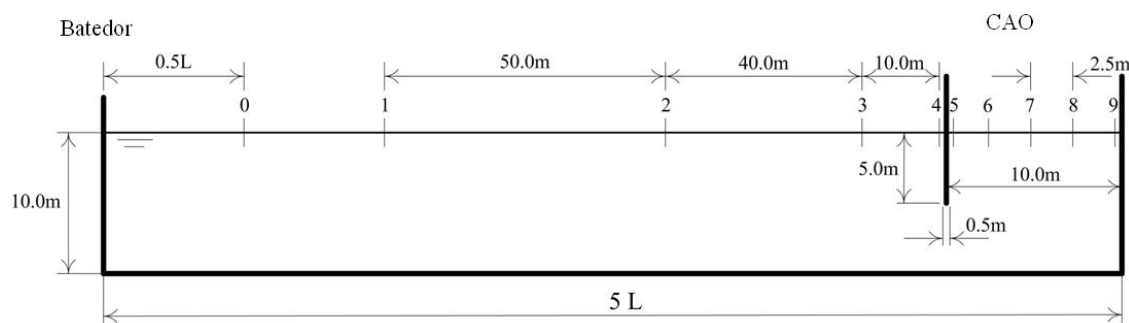


Fig. 1. Esquema do canal numérico e da câmara da CAO e posição das sondas de elevação de superfície livre para a configuração de 10m de comprimento (Davyt et al. [16]).

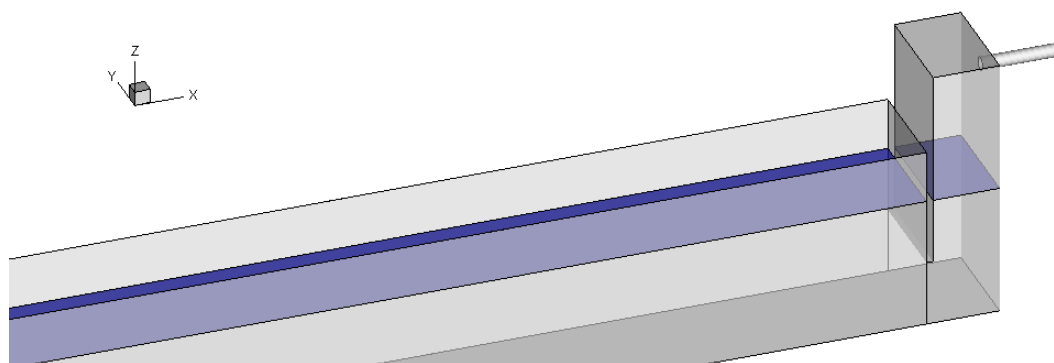


Fig. 2. Modelo do conjunto canal de onda e dispositivo CAO (câmara e conduta).

### 3 MODELOS NUMÉRICOS

No presente trabalho são aplicados dois códigos numéricos que resolvem as equações de RANS para simular os fenómenos resultantes da interacção das ondas com um DAEO-CAO. O primeiro código, FLUINCO, é baseado na técnica dos elementos finitos e de seguimento de superfície livre e o segundo, FLUENT, é baseado na técnica dos volumes finitos e no método de captura de superfície livre VoF.

#### 3.1 Código FLUENT

O código FLUENT (versão 6.3.26) [22] 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 [22].

A modelação da superfície livre é feita utilizando o método VoF. Este método, desenvolvido inicialmente por Hirt e Nichols [23], 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  $k-\epsilon$  standard. Na resolução do sistema de equações utilizou-se o algoritmo SIMPLEC, com subrelaxação apenas nas equações de  $k$  e  $\epsilon$ .

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 (*High Resolution Interface Capturing* [24]. A pressão é determinada pelo esquema PRESTO! (*PREssure STaggering Option*) [22].

Aproveitando a simetria do problema em relação ao plano longitudinal e vertical, o domínio computacional corresponde a apenas metade do domínio real.

A malha de discretização utilizada para a configuração de profundidade finita é composta aproximadamente por  $3.0 \times 10^7$  volumes de controlo, sendo mais refinada nas proximidades do dispositivo. Na região de propagação das ondas, a discretização vertical é composta de 24 segmentos iguais, com 18 segmentos por altura de onda e utilizam-se aproximadamente 60 segmentos por comprimento de onda, assegurando assim uma boa precisão não só da propagação da onda mas também da conservação da sua altura ao longo do canal [25]. A Figura 3 apresenta uma vista da malha 3D para a configuração do dispositivo incluindo o modelo de turbina.

No fundo do canal e nas paredes do dispositivo é utilizada a condição de aderência com velocidade nula. Na fronteira superior é imposta a pressão atmosférica, permitindo a entrada ou saída do ar. Na abertura superior da câmara-de-ar é imposta a pressão atmosférica (configuração com topo aberto) ou a pressão no interior da câmara pneumática devida à perda de carga imposta pelo modelo de turbina.

O passo de tempo usado é  $T/640$ , onde  $T$  é o período da onda incidente. É 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  $10^{-3}$  [17].

Como condições iniciais, foram impostas as componentes da velocidade, nulas em todo o domínio e a pressão hidrostática, considerada nula na superfície livre.

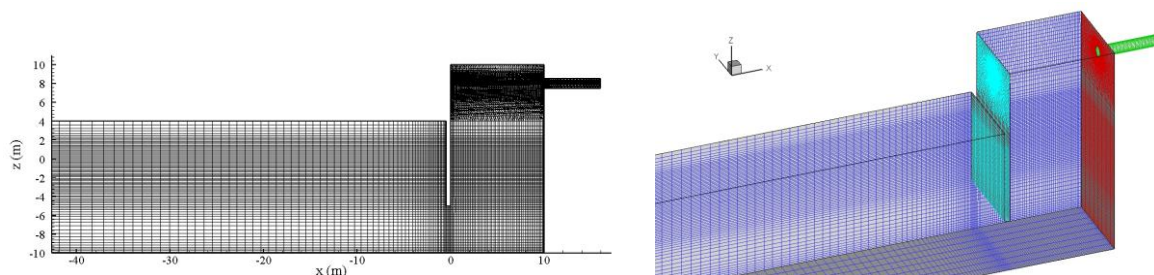


Fig. 3. Malha na proximidade do dispositivo incluindo o modelo de turbina: malha no plano de simetria (Esquerda) e malha nas fronteiras (Direita, vista 3D).

### 3.2 Código FLUINCO

O código FLUINCO, desenvolvido por Teixeira [26, 27], 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 utilizada uma formulação Lagrangeana-Euleriana arbitrária (*arbitrary lagrangean eulerian* - ALE) para permitir a solução de problemas que envolvem grandes movimentos relativos entre corpos e superfícies e movimentos da superfície livre.

Para a discretização no espaço é aplicado o método clássico dos resíduos ponderados de Galerkin empregando um elemento tetraédrico. O elemento tetraédrico tem a vantagem de se adaptar aos domínios de geometrias complexas e de ser um elemento com 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 [28].

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 [29], utilizando o comprimento de mistura proposto por Johns [30].

Outros detalhes relativos à aplicação deste código a este tipo de problemas podem ser encontrados em Teixeira et al. [19, 26, 27].

Aproveitando a simetria do problema em relação ao plano longitudinal e vertical, como já foi referido anteriormente, o domínio computacional é apenas metade do domínio real.

A malha de elementos finitos possui aproximadamente  $2.2 \times 10^5$  nós e  $5.3 \times 10^5$  tetraedros. O tamanho médio da aresta dos elementos localizados na região a montante do cilindro é de aproximadamente 0.02m. Na região do dispositivo, adoptou-se um tamanho médio de aresta de elemento de 0.002 m. O passo de tempo adoptado foi de 0.0002s, 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 [19].

### 3.3 Geração de ondas

As ondas regulares são geradas através da imposição de três condições limites na fronteira de entrada do domínio computacional: a elevação de superfície livre e as duas componentes de velocidades (na direcção horizontal e vertical). Estas grandezas são determinadas a partir dos perfis de velocidade e posição da superfície livre obtidos pela teoria linear das ondas [31].

Estas condições limites são identicamente impostas quer no modelo FLUENT quer no modelo FLUINCO.

### 3.4 Modelo do efeito de perda de carga induzida por uma turbina Wells

Os dois modelos numéricos FLUENT e FLUINCO são baseados em conceitos diferentes na modelação da superfície livre, método de captura e método de seguimento, respectivamente. Assim, no modelo FLUENT, o escoamento da água e do ar são simulados, no modelo FLUINCO apenas o escoamento da água é modelado. Assim, o efeito de perda de carga induzido por uma turbina de tipo *Wells* tem de ser simulado de forma diferente em cada um dos códigos.

A turbina *Wells* é a mais utilizada em dispositivos de coluna de água oscilante. Foi inventada em meados da década de 70 e caracteriza-se por o seu veio acoplado ao do gerador eléctrico ter sempre o mesmo sentido de rotação, independentemente da direcção do escoamento. É accionada pela diferença de pressão entre a câmara-de-ar e o exterior e actua quer na insuflação como na exaustão, provocada pelo ciclo que as ondas induzem na câmara pneumática. A relação entre a perda de carga e o caudal que flui na turbina (curva característica) pode ser considerada linear nas turbinas *Wells*.

#### 3.4.1 Modelo de perda de carga no FLUENT

No código FLUENT, o efeito da turbina é introduzido através de uma lei de perda de carga como condição de fronteira da conduta, onde esta está localizada. A turbina *Wells*, como já foi referido, é caracterizada por uma curva característica linear, ou seja a perda de carga varia linearmente com a velocidade do escoamento. Numericamente, o modelo de turbina é construído usando uma UDF (*User defined Function*), onde se define o caudal médio,  $Q_m$ , na secção da turbina, de área  $S$  (secção da conduta). A partir da intensidade da velocidade,  $u$ , calcula-se a perda de carga resultante,  $\Delta p$ , imposta na secção da turbina como condição de fronteira. O caudal e a perda de carga são calculados de acordo com as expressões seguintes:

$$Q_m = \int_S u \, dS \quad (1)$$

$$\Delta p = Ksi \cdot Q_m \quad (2)$$

onde  $Ksi$  ( $\text{Pa.s/m}^3$ ) é a característica da turbina.

Com esta metodologia evita-se a modelação da turbina como parte integrante da malha, poupando tempo de cálculo ao mesmo tempo que se acrescenta fiabilidade e versatilidade ao modelo.

#### 3.4.2 Modelo de perda de carga no FLUINCO

No FLUINCO é utilizado um modelo aerodinâmico para a determinação da pressão de ar dentro da câmara-de-ar, em cada passo de tempo, a qual é imposta sobre a superfície da água no modelo hidrodinâmico. O modelo aerodinâmico baseia-se na aplicação do primeiro princípio da termodinâmica ao ar dentro da câmara, considerado como um gás ideal [10]. Assim, na hipótese de uma transformação isoentrópica e desprezando a energia cinética e potencial, a equação de balanço de energia pode ser apresentada da seguinte forma:

$$\frac{\dot{P}(t)}{P(t)} = \gamma \left[ -\frac{(P(t) - P_0)}{Ksi \cdot V(t)} \left( 1 - \varepsilon \frac{\rho(t) - \rho_0}{\rho(t)} \right) - \frac{\dot{V}(t)}{V(t)} \right] \quad (3)$$

onde  $P$  e  $\dot{P}$  são a pressão e sua taxa, respectivamente;  $P_0$  é a pressão atmosférica;  $V$  e  $\dot{V}$  são o volume de ar dentro da câmara e a sua taxa de variação, respectivamente;  $\gamma = c_p/c_v$ , onde  $c_p$  e  $c_v$  são os calores específicos a pressão e volume constantes, respectivamente;  $\rho$  e  $\rho_0$  são as massas específicas do ar dentro e fora da câmara,

respectivamente;  $\varepsilon$  tem um valor nulo para caudal de ar na turbina negativo (ar entrando na câmara) e um para o caso contrário.

Para a actualização da massa específica, é considerada a transformação isoentrópica, resultando na seguinte equação:

$$P(t) \rho(t)^{-\gamma} = P_0 \rho_0^{-\gamma} \quad (4)$$

No modelo aerodinâmico implementado no FLUINCO, discretiza-se temporalmente a Eq. (3) em séries de Taylor até à segunda ordem para a determinação da pressão a cada passo de tempo. A massa específica é calculada após o cálculo da pressão.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são analisados comparando o factor de amplificação, o ângulo de fase, o *sloshing* e a potência pneumática (no caso da CAO fechada).

O factor de amplificação,  $Q$ , é definido como a razão entre a elevação dentro da câmara e a elevação da onda incidente. Devido ao *sloshing* dentro da câmara, utilizou-se uma elevação média obtida a partir das elevações das sondas internas.

O ângulo de fase,  $\phi$ , é determinado pela diferença angular entre a onda dentro e fora da câmara.

O *sloshing*,  $s$ , é definido aqui como o desvio padrão da elevação da superfície livre dentro da câmara, considerando as cinco sondas.

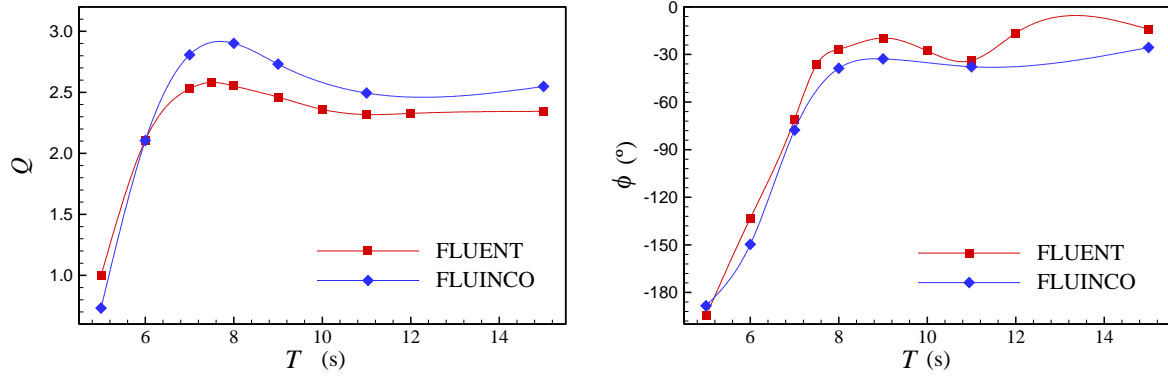
A potência pneumática,  $Pp$ , é calculada a partir do caudal induzido pelo movimento da superfície livre dentro da CAO e da pressão média na câmara-de-ar. A potência pneumática média é obtida calculando a média da potência pneumática num intervalo de tempo.

### 4.1 Dispositivo CAO com câmara pneumática à pressão atmosférica

As Figuras 4 e 5 apresentam o factor de amplificação, o ângulo de fase e o *sloshing* obtidos pelos códigos FLUENT e FLUINCO para a câmara pneumática à pressão atmosférica e para os dois comprimentos da câmara, 5.0m e 10.0m, respectivamente. Observa-se uma boa concordância geral entre os resultados numéricos dos dois códigos e verifica-se que as tendências são similares. O factor de amplificação obtido pelo FLUENT e FLUINCO apresenta algumas diferenças para  $L_{cao}=5.0m$  e  $L_{cao}=10.0m$ . No entanto, o período de ressonância, em torno de 7.5s, é obtido pelos dois modelos numéricos no caso da câmara pneumática de 5.0m de comprimento. O ângulo de fase apresenta as mesmas tendências quer no FLUENT quer no FLUINCO. A mudança de fase é idêntica nos dois modelos e apenas se verificam algumas divergências ao nível dos valores do ângulo de fase para os maiores períodos. O *sloshing* apresenta também as mesmas tendências. Verificam-se diferenças entre os valores de  $s$  mas os máximos do *sloshing* são identificados por ambos códigos.

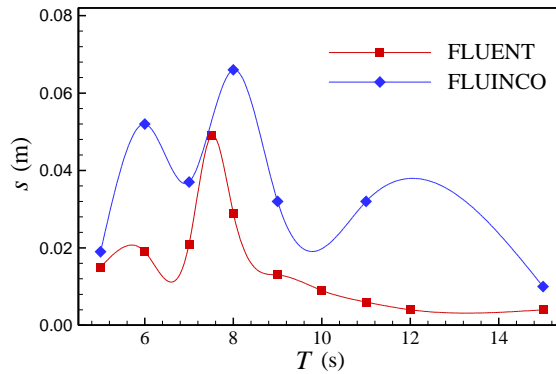
Pode-se observar, comparando as Figuras 4a e 5a, que o factor de amplificação apresenta comportamentos diferentes conforme o comprimento da CAO. Para  $L_{cao}=5.0m$ , observa-se uma frequência de ressonância em torno do período  $T=7.5s$ , onde se verifica o máximo do factor de amplificação,  $Q \sim 2.6$ . No entanto, para  $L_{cao}=10m$ , não se observa uma frequência de ressonância no intervalo de período de onda estudado, mas apenas uma convergência do factor de amplificação para o valor  $Q \sim 2.0$  para os períodos superiores ou iguais a 10s.

O ângulo de fase é apresentado nas Figuras 4b e 5b. Verifica-se que para  $L_{cao}=5.0m$  a transição de fase é mais rápida que para  $L_{cao}=10.0m$ . Foi verificado, para dispositivos offshore, que a fase está intimamente ligada à ressonância [17, 18, 19]. Assim, a ressonância manifesta-se quando a diferença angular entre a onda fora e dentro da câmara pneumática está quase em anti-fase. Conforme este critério, verifica-se, para  $L_{cao}=5.0m$ , que a ressonância deve produzir-se em torno do período  $T=8s$ , valor de período que corresponde aproximadamente ao período para qual é obtido o máximo do factor de amplificação,  $T=7.5s$ . No caso  $L_{cao}=10.0m$ , a ressonância deveria manifestar-se em torno do período  $T=10s$ . No entanto, verifica-se apenas um pequeno máximo no factor de amplificação no caso do FLUINCO para este período.



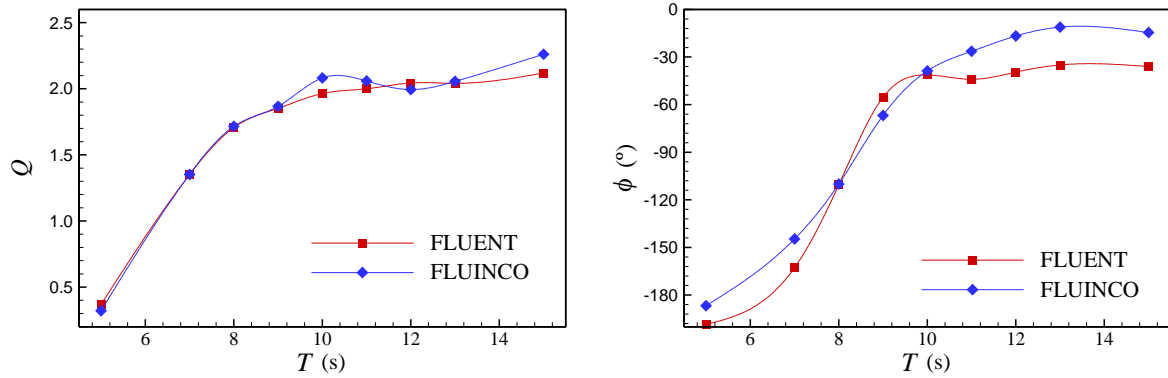
a) Factor de amplificação vs. período da onda

b) Ângulo de fase vs. período da onda



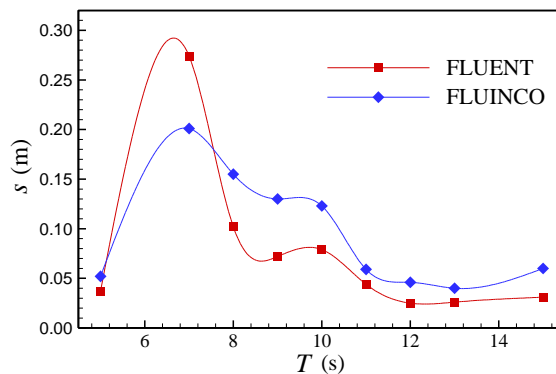
c) *sloshing* vs. período da onda

Fig. 4. Câmara pneumática aberta (a pressão atmosférica) para  $L_{cao}=5.0$ m.



a) Factor de amplificação vs. período da onda

b) Ângulo de fase vs. período da onda



c) *sloshing* vs. período da onda

Fig. 5. Câmara pneumática aberta (a pressão atmosférica) para  $L_{cao}=10.0$ m.

Apresenta-se o sloshing nas Figuras 4c e 5c. Para  $L_{cao}=5.0m$ , o sloshing é quase inexistente. Para  $L_{cao}=10.0m$ , o sloshing é importante em torno do período 7s. Para este período, o comprimento de onda é de cerca de 60m, ou seja apenas 6 vezes o comprimento da CAO, favorecendo o sloshing na câmara. No entanto, para o período de onda inferior,  $T=5.0s$ , observa-se que o sloshing é mais reduzido, o que sugere a existência de uma ressonância para a agitação na CAO em torno do período 7.5s.

#### 4.2 Dispositivo CAO com modelo de uma turbina

A Figura 6 apresenta os resultados dos dois códigos para a câmara-de-ar fechada, com comprimento de 5.0m, largura de 8.0m e altura de 20.0m, modelando o efeito dissipativo de uma turbina de tipo *Wells* com a característica  $K_{si}=120Pa.s/m^3$ . O factor de amplificação,  $Q$ , o ângulo de fase,  $\theta$ , o sloshing,  $s$ , e a potência pneumática média,  $P_p$ , são comparados na Figura 6. Observa-se uma boa concordância entre os resultados, embora os dois programas numéricos sejam baseados em métodos totalmente diferentes. O factor de amplificação apresenta a mesma tendência, com o FLUINCO a prever valores um pouco superiores ao FLUENT. A fase e o sloshing evoluem de maneira similar, sendo o sloshing com valores um pouco superiores ao FLUENT, como na configuração anterior. A potência pneumática média determinada pelos dois códigos apresenta também a mesma característica, com um máximo definido em torno de 7.5s. Para este período, que corresponde ao valor máximo da potência pneumática média, a diferença de potência entre FLUENT e FLUINCO é de 13%. É de salientar que o factor de amplificação, na Figura 6a, não apresenta qualquer máximo relacionado com o máximo da potência pneumática. No entanto, na configuração sem efeito dissipativo (Figura 4a), observa-se um valor máximo, bem identificado, no factor de amplificação para o período de onda incidente de 7.5s.

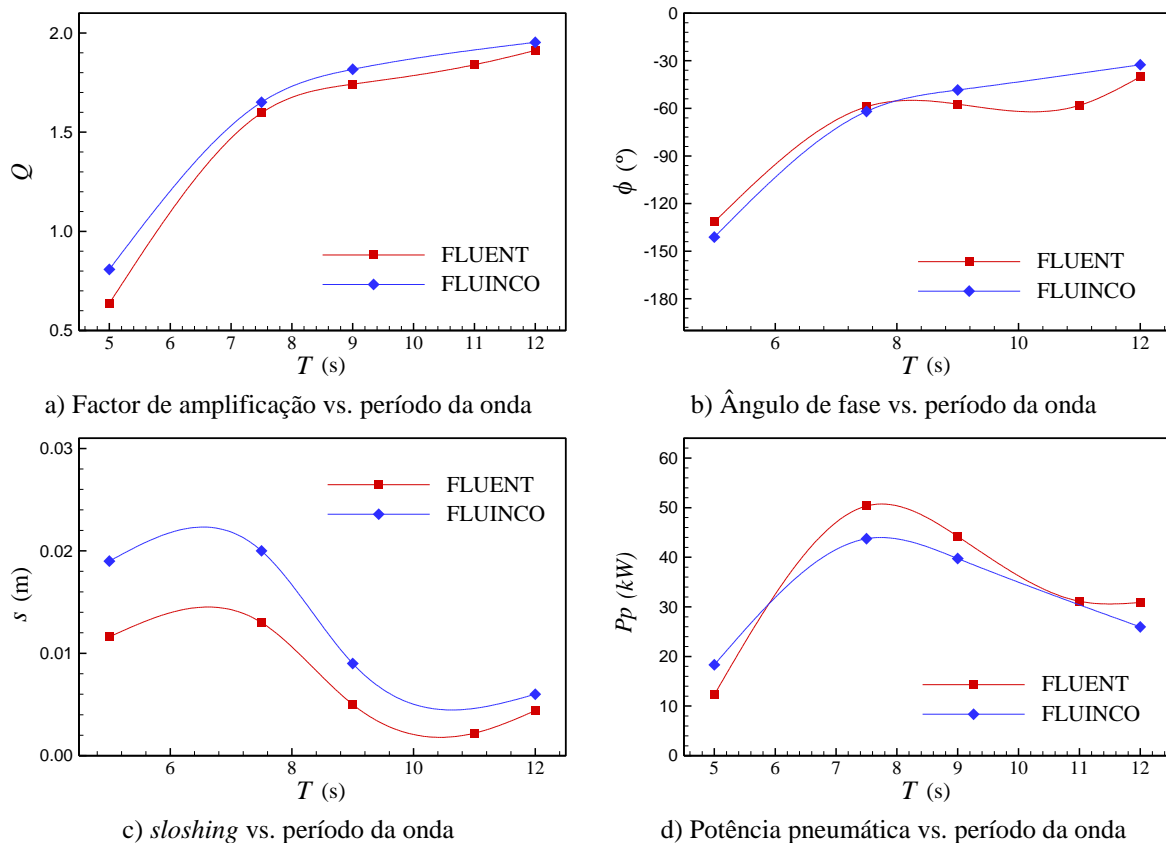


Fig. 6. Câmara pneumática fechada com modelo de turbina (com característica  $K_{si}=120Pa.s/m^3$ ).

### 5 CONCLUSÕES

No presente artigo dois modelos numéricos que resolvem as equações totalmente não lineares de Navier-Stokes-Reynolds em valor médio – RANS – com superfície livre são utilizados para simular um dispositivo de tipo Coluna de Água Oscilante – CAO – localizado na extremidade de um canal numérico de onda tridimensional: i) FLUENT, que resolve as equações RANS, utiliza a técnica VoF (*Volume of Fluid*) para a determinação da superfície livre e um modelo de perda de carga para modelar o efeito dissipativo provocado por uma turbina; ii) FLUINCO, que utiliza o método de elementos finitos para resolver as equações RANS, considera a superfície



livre da água como uma fronteira onde é aplicada a condição de pressão e um modelo aerodinâmico baseado na aplicação do primeiro princípio da termodinâmica no sistema de ar dentro da câmara. Os dois modelos numéricos, baseados em métodos de resolução totalmente diferentes, quer na formulação hidrodinâmica quer na formulação aerodinâmica, são comparados para duas configurações do dispositivo de CAO: i) câmara-de-ar aberta, i.e. à pressão atmosférica; ii) câmara-de-ar fechada com modelação do efeito de uma turbina de tipo *Wells*.

Os resultados numéricos obtidos pelos dois códigos mostram um comportamento muito semelhante, identificando o período para o qual ocorre a ressonância do dispositivo, quer na configuração de câmara-de-ar aberta quer na configuração de câmara-de-ar fechada com efeito dissipativo devido à turbina.

## 6 AGRADECIMENTOS

Eric Didier e Luís Gil agradecem o financiamento do centro de investigação MARETEC. Paulo Teixeira e Djavan Davyt agradecem os apoios financeiros do Cnpq (projeto 303308/2009-5) e da CAPES.

## REFERÊNCIAS

1. Masuda, Y., McCormick, M.E., *Experiences in pneumatic wave energy conversion in Japan*. In: McCormick ME, Kim YC, editors. Utilization of ocean waves-wave to energy conversion. New York: ASCE, 1-33, 1987.
2. Falcão, A., Wave energy utilization: A review of the technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 899-918, 2010.
3. Enciso, Y., Ortubia, I., Aguilera, L., Marqués, J., Mutriku Wave Power Plant: from the thinking out to the reality, *Proc. 8Th European Wave and Tidal Energy Conference*, Uppsala, Sweden, 2009.
4. Brito-Melo, A., *Modeling and pre-dimensioning of oscillating water column power plants: application to the Pico (Azores) wave power plant*, Tese de doutorado, Instituto Superior Técnico (Lisbon) / École Centrale de Nantes, 2000.
5. Wang, D., Katory, M., Li, Y., Analytical and experimental investigation on the hydrodynamic performance of onshore wave-power devices, *Ocean Engineering*, 29 871-885, 2002.
6. Delaure, Y.M.C., Lewis, A., 3D hydrodynamic modeling of fixed oscillating water column wave power plant by a boundary element methods, *Ocean Engineering*, 30 309-330, 2003.
7. Alves, M., Sarmento, A., Non-Linear and Viscous Diffraction Response of OWC Wave Power Plants, *Proc. 6Th European Wave and Tidal Energy Conference*, Glasgow, UK, 2005.
8. El Marjani, A., Castro, F., Bahaji, M., Filali, B., 3D Unsteady Flow Simulation in na OWC Wave Converter Plant, *Proc. ICREPQ'06*, Palma de Mallorca, Espanha, 2006.
9. 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, *Proc 7th European Wave and Tidal Energy Conference*, Porto, Portugal, 2007.
10. Josset, C., Clément, A. H., A time-domain numerical simulator for oscillating water column wave power plants, *Renewable Energy*, 32 1379-1402, 2007.
11. Hong, K., Shin, S., Hong, D., Choi, H., Hong, S., Effects of Shape Parameters of OWC Chamber in Wave Energy Absorption, *Proc. ISOPE*, Lisbon, Portugal, 2007.
12. Horko M., *CFD Optimization of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter*, Master of Engineering Science Thesis, University of Western Australia, Australia, 2007.
13. Paixão Conde J.M., Gato L.M.C., Numerical study of the air-flow in an oscillating water column wave energy converter, *Renewable Energy*, 33 2637-2644, 2008
14. Liu, Z., Shi, H., Hyun, B., Practical design and investigation of the breakwater OWC facility in China, *Proc. 8th EWTEC – European Wave and Tidal Energy Conference*, Uppsala, Sweden, 2009.
15. Liu, Z., Hyun, B., Hong, K., Lee, Y., Investigation on Integrated System of Chamber and Turbine for OWC Wave Energy Converter, *Proc. ISOPE*, Osaka, Japão, 2009.
16. Davyt, D., Teixeira, P.R.F., Ramalhais, R., Didier, E., Numerical analysis of regular waves over an onshore Oscillating Water Column, *Proc. ENCIT 2010*, Uberlandia - MG, Brasil, 2010.
17. Barreiro, T., Didier, E., Gil, L., and Alves, M., Simulação numérica não linear do escoamento gerado pela interação entre a agitação marítima e conversores pontuais de energia das ondas, *Proc. III Conferência Nacional em Mecânica de Fluidos Termodinâmica e Energia*, Bragança, Portugal, 2009.

18. Barreiro, T., *Estudo da interação de uma onda monocromática com um conversor de energia*, Tese de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2009.
19. Teixeira, P.R.F., Didier, E., Paixão Conde, J.M., Análise numérica de um equipamento de energia das ondas do tipo OWC, *Proc. 6as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Funchal, Portugal, 2009.
20. Paixão Conde, J.M., Teixeira, P.R.F., Didier, E., Numerical Simulation of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter: Comparison of two Numerical Codes, *Proc. 21st Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE*, Maui, Hawaii, USA, 668-674, 2011.
21. Didier, E., Paixão Conde, J.M., Teixeira, P.R.F., Numerical simulation of an oscillating water column wave energy converter with and without damping, *Proc. International Conference on Computational Methods in Marine Engineering – MARINE 2011*, Lisboa, Portugal, 2011.
22. Fluent, *Fluent 6.3 User's Guide*, Fluent Inc, USA., 2006.
23. Hirt, C.W., Nichols, B.D., Volume of fluid (VoF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comp. Phys.*, 39 201-225, 1981.
24. Peric, M., Ferziger, J.H., *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Second edition, Springer, 1997.
25. Didier, E., Gil, L., Anselmo, A., Analise do escoamento viscoso em torno dum cargo (Tipo Série60,  $C_b=0.6$ ), *Proc. Métodos Numéricos e Computacionais em Engenharia – CMNE*, 548 (19 p. CDrom), Porto, Portugal, 2007.
26. Teixeira, P.R.F., Awruch, A.M., Numerical simulation of three dimensional incompressible flows using the finite element method, *Proc 8th ENCIT*, Porto Alegre, Brazil, 2000.
27. 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, 2001.
28. 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*, 7 1053-1075, 1987.
29. Mittal, S., Tezduyar, T.E., Parallel finite element simulation of 3D incompressible flows-fluid-structure interaction, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 21 933-953, 1995.
30. Johns, B., The modeling of the free surface flow of water over topography, *Coastal Engineering*, 15 257-278, 1991.
31. LeMéhauté, B (1976). *An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*, Springer-Verlag.