



CEODOURO – ESTUDOS NUMÉRICOS DO ESCOAMENTO NUMA CÂMARA HIDRO-PNEUMÁTICA

J. M. Paixão Conde^{1,2,*} e L. M. C. Gato²

1: Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa
Monte de Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal
E-mail: jpc@fct.unl.pt

2: IDMEC, Instituto Superior Técnico
Universidade Técnica de Lisboa
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal
E-mail: luis.gato@ist.utl.pt

Resumo

Neste artigo apresentam-se os diversos estudos numéricos efectuados com vista à caracterização do escoamento numa câmara hidropneumática da central de aproveitamento de energia das ondas proposta para instalação no molhe norte na barra do Douro. Esta central, do tipo coluna de água oscilante, é composta de duas câmaras hidropneumáticas, cada uma equipada com duas turbinas de eixo vertical, dispostas assimetricamente no topo da câmara. Descrevem-se neste artigo as diferentes simulações numéricas efectuadas, considerando diferentes hipóteses simplificadoras e diferentes geometrias. Estas simulações foram efectuadas com o código numérico comercial FLUENT.

Palavras-chave: Energia das Ondas, Coluna de Água Oscilante, Simulação Numérica.

1. INTRODUÇÃO

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. 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 [1].

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, de que se apresenta um esquema na figura 1, 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 [2]. 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. Já foram construídas diversas instalações junto a costa, em diferentes partes do mundo [3]. A médio prazo, prevê-se a instalação de parques de sistemas flutuantes de CAO, ao largo da costa, em zonas com profundidades de 40 a 70 m [4].

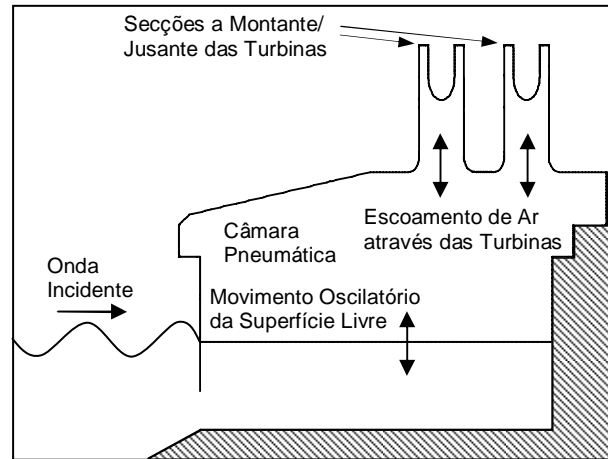


Fig. 1. Representação esquemática de um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante.

A cadeia de conversão energética num DCEO-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 [5, 6].

A turbina de ar é considerada o elemento mais crítico na cadeia de conversão de energia dum sistema de CAO. Esta está sujeita a condições de funcionamento muito mais exigentes do que em outras aplicações, incluindo os aproveitamentos eólicos (o escoamento é aleatório e altamente variável ao longo de diversas escalas de tempo).

Em virtude das suas características inerentemente auto-rectificadoras (capacidade de funcionar no mesmo sentido de rotação independentemente do sentido do escoamento de ar), a turbina Wells é a solução que tem sido mais frequentemente adoptada na conversão de energia em sistemas de CAO [6-8]. Recentemente, a turbina axial auto-rectificadora de acção tem vindo progressivamente a ser considerada como uma alternativa à turbina Wells para equipar sistemas de CAO [9-14]. Em comparação com a turbina Wells, as suas vantagens são o seu pequeno diâmetro e baixo ruído em consequência da baixa velocidade de rotação.

Um problema típico num sistema de CAO é o projecto da câmara pneumática (área de secção transversal grande e baixa velocidade) e da conduta de ligação à(s) turbina(s) (área de secção transversal pequena e elevada velocidade) o que requer um equilíbrio entre critérios de segurança e de eficiência. A transição entre estas duas estruturas deve ser suave e o mais curta possível, evitando variações bruscas de direcção do escoamento, de forma a evitar distribuições assimétricas do escoamento na secção de entrada da turbina, o que reduziria acentuadamente o seu rendimento aerodinâmico [8].

A colocação de turbinas de eixo vertical sobre a câmara pneumática pode também trazer problemas, devido à interacção do jacto de ar admitido na câmara, na fase descendente do ciclo, com a superfície livre da água, podendo produzir uma nuvem de gotículas de água que entrará em contacto com a turbina, na fase ascendente do ciclo [15]. Uma forma prática de evitar este problema é a introdução de uma placa deflectora no interior da câmara pneumática, sob o(s) eixo(s) da(s) turbina(s). Este procedimento permite evitar a produção da referida nuvem de gotículas de água na fase descendente, e estando colocada suficientemente longe da(s) secção(ões) de entrada da(s) conduta(s) não perturba significativamente o escoamento nestas, na fase ascendente da onda [16-19,21].

Neste artigo apresentam-se os diversos estudos numéricos efectuados com vista à



caracterização do escoamento numa câmara hidropneumática da central de aproveitamento de energia das ondas proposta para instalação no molhe norte na barra do Douro. Esta central, do tipo coluna de água oscilante, é composta de duas câmaras hidropneumáticas, cada uma equipada com duas turbinas de eixo vertical, dispostas assimetricamente no topo da câmara [15,22]. Descrevem-se neste artigo as diferentes simulações numéricas efectuadas, considerando diferentes hipóteses simplificadoras e diferentes geometrias [16-21]. Estas simulações foram efectuadas com o código numérico comercial FLUENT 6.2.16 [23]. Todas as malhas de discretização do domínio de cálculo foram efectuadas recorrendo ao gerador de malha Gambit 2.2.30 [24-25], um pré-processador do código Fluent.

2. CARACTERIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS EFECTUADAS

2.1 Código FLUENT

O código FLUENT aplica uma técnica de volumes finitos a uma malha centrada para discretizar as equações que descrevem o escoamento. Estas são a equação da continuidade e as equações de Navier-Stokes em valor médio (eq. de Reynolds). As tensões de Reynolds são modeladas pelo modelo de turbulência a duas equações $k-\varepsilon$. A superfície livre é identificada pela técnica de captura *Volume of Fluid* (VoF)

Este código resolve a forma linearizada do sistema das referidas equações discretizadas utilizando um algoritmo de resolução do tipo Gauss-Siedel ponto-a-ponto, em conjunto com um método algébrico de malha múltipla.

Os termos difusivos das equações são discretizados pelo esquema de diferenças centrais de segunda ordem (CDS). Nas simulações efectuadas, os termos convectivos nas faces dos volumes de controlo foram interpolados pelos esquemas de diferenças de montante de primeira ordem (UDS); lei de potência de primeira ordem (PLDS); diferenças de montante de segunda ordem (LUDS); MUSCL de segunda ordem; ou QUICK de terceira ordem. Na equação VoF utilizou-se o esquema *High Resolution Interface Capturing* (HRIC) [23]. O algoritmo de resolução é do tipo SIMPLE [23,26].

2.2 Geometrias, configurações e malhas de discretização

2.2.1 Geometrias tridimensionais

O domínio computacional original (configuração 1-3D), apresentado na Fig. 2(a), é uma versão simplificada da câmara pneumática do DAEO-CAO proposto para instalação no molhe norte na barra do Douro [15,19,22]. A câmara pneumática está compreendida entre: 2 m e 10 m na direcção do eixo z , a cota $z = 2$ m corresponde à posição média da superfície livre e $z = 0$ corresponde ao zero hidrográfico; -1 m e 19.1 m na direcção do eixo x ; -2.45 m e 9.2 m na direcção do eixo y . As condutas das duas turbinas estão localizadas assimetricamente no topo da câmara.

Na configuração 2-3D, Fig. 2(b), introduziu-se na câmara, sob as condutas das turbinas, uma placa deflectora horizontal para evitar a formação de *spray* na fase descendente da onda. A placa foi colocada à cota $z = 7.5$ m para evitar os impactos da superfície livre da água na fase ascendente da onda e minimizar a perturbação do escoamento nas condutas de ligação às turbinas. Nesta configuração foram ignorados a espessura e os suportes da placa.

As configurações 3-3D e 4-3D, Figs. 2(c) e 2(d), apresentam as seguintes diferenças em relação às configurações 1-3D e 2-3D: para garantir estabilidade estrutural a câmara foi dividida em 15 alvéolos abertos entre $z = 2$ m e $z = 4$ m; foram introduzidos os três suportes da placa; é considerada a espessura da placa; introduziu-se a conduta da válvula de alívio entre as condutas das turbinas; as condutas das turbinas têm menor diâmetro e maior comprimento. Estas configurações reflectem modificações no projecto inicial efectuadas após as simulações para as geometrias 1-3D e 2-3D terem sido efectuadas. As configurações 3-3D e 4-3D diferem entre si apenas nas dimensões e localização da placa. Os resultados para a configuração 3-3D não são aceitáveis, no que diz respeito à produção de *spray*, por esta razão utilizou-se uma

placa maior na configuração 4-3D [19,21].

As formas, dimensões e posicionamento das condutas e das diferentes placas deflectoras encontram-se caracterizados em [16,19,21].

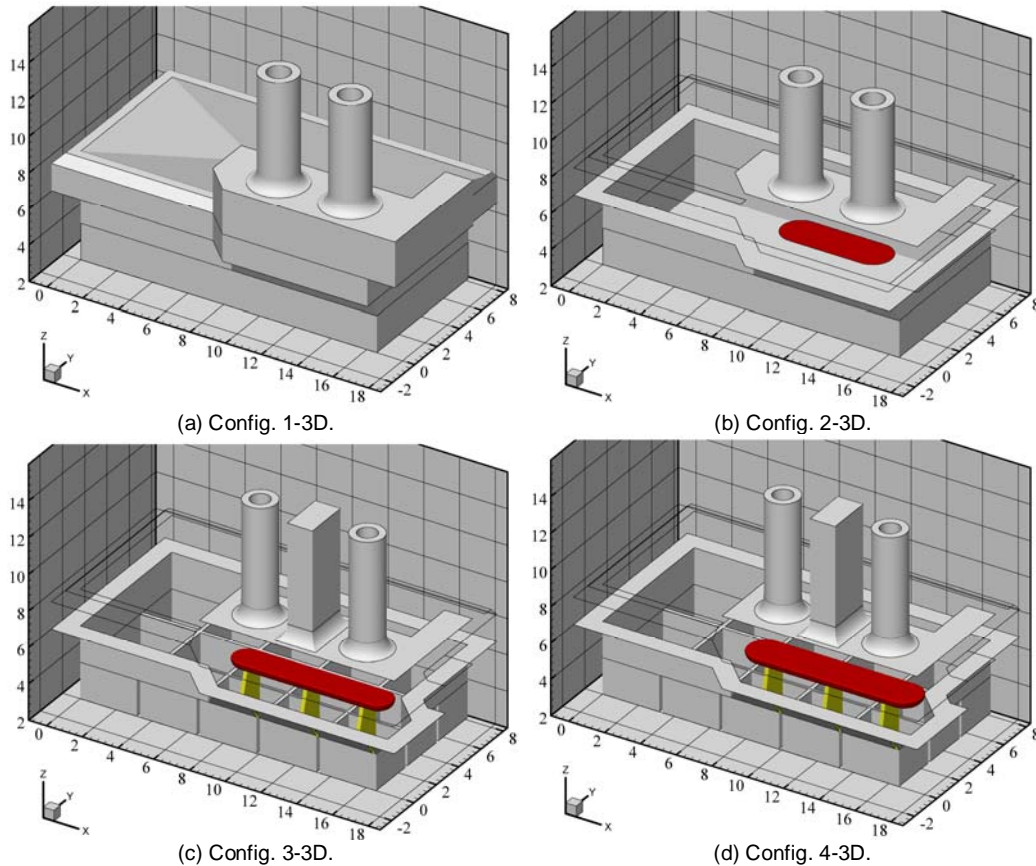


Fig. 2. Configurações do domínio: geometrias tridimensionais.

As malhas de discretização, cujas características e detalhes construtivos se apresentam em [16,19,21], são compostas por elementos hexaédricos e tetraédricos, sendo mais densas nas zonas do domínio onde os gradientes de velocidade são maiores.

Para a configuração 1-3D consideraram-se quatro níveis de refinamento para a malha, o número total de elementos é aproximadamente igual a: 3×10^5 para a malha mais grosseira (malha I); $9,2 \times 10^5$ para a malha II; $1,07 \times 10^6$ para a malha III; e $1,32 \times 10^6$ para a malha IV.

Para cada uma das restantes configurações utilizou-se apenas uma malha de discretização. Estas malhas foram construídas de forma análoga à malha II da configuração 1-3D. O número total de elementos é aproximadamente igual a: 10^6 para a configuração 2-3D; $1,97 \times 10^6$ para a configuração 3-3D; e $2,1 \times 10^6$ para a configuração 4-3D. Estas são malhas relativamente grosseiras, no entanto, face aos resultados apresentados na secção 3.1 conclui-se que é possível obter soluções independentes da malha para estes refinamentos [16,19].

2.2.1 Geometrias bidimensionais

As simulações numéricas em regime variável no tempo apresentam uma dificuldade acrescida: o tempo de cálculo para as geometrias tridimensionais complexas, com malhas de discretização compostas por mais de 10^6 elementos, pode-se tornar incomportável [19,21] atendendo à necessidade de apresentar resultados em curto espaço de tempo, como é prática corrente em problemas de engenharia. A utilização de geometrias bidimensionais simplificadas pode ser uma alternativa às geometrias tridimensionais, uma vez que os tempos de cálculo para as geometrias bidimensionais são substancialmente inferiores aos verificados para as geometrias tridimensionais. Esta abordagem simplista de um problema complexo deve ser feita

com alguns cuidados e as conclusões que se retirarem não poderão ser extrapoladas directamente para o escoamento na geometria tridimensional.

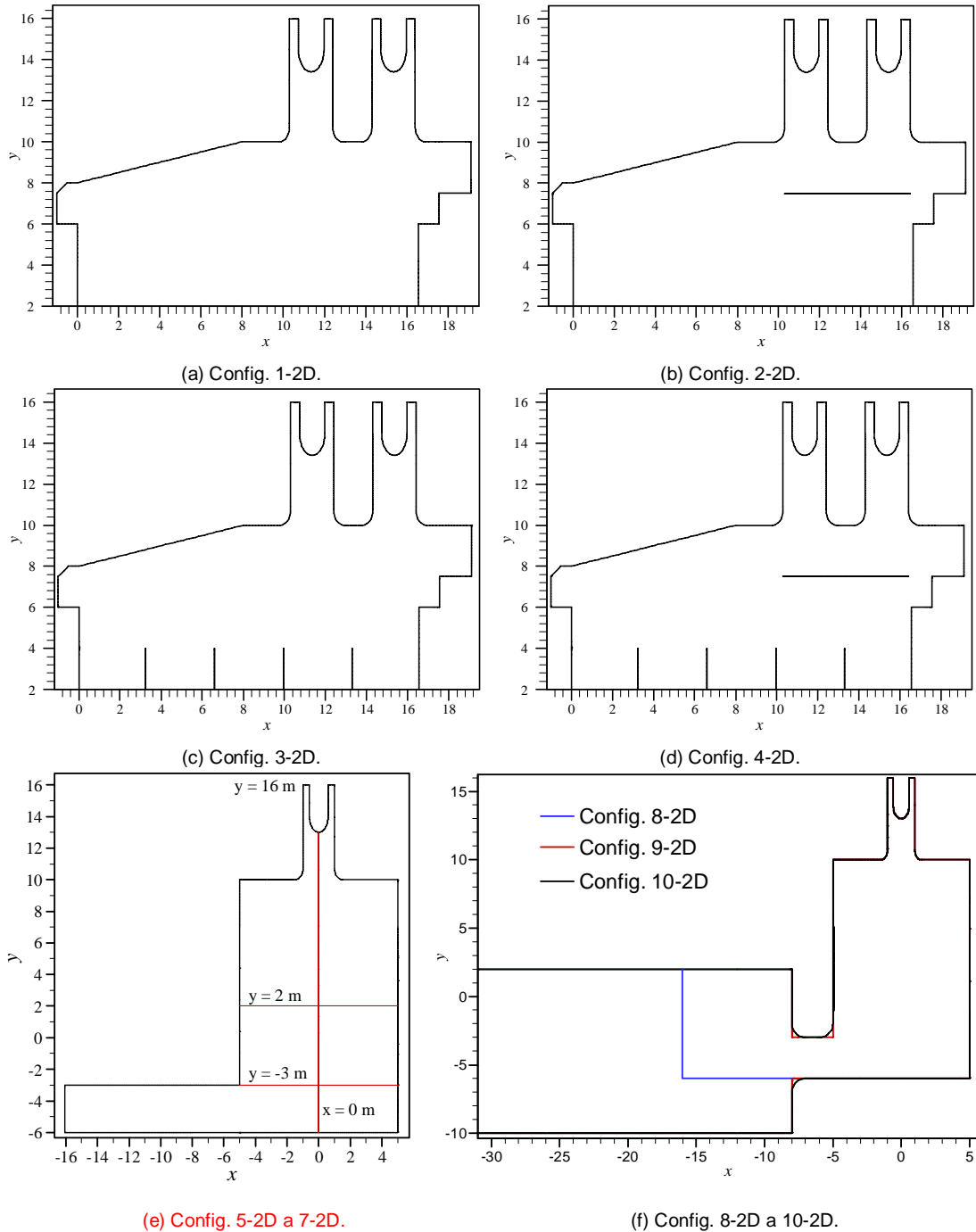


Fig. 3. Configurações do domínio: geometrias bidimensionais.

As geometrias bidimensionais utilizadas neste estudo são simplificações bidimensionais da geometria real tridimensional. Tal como se pode observar nas figuras 3(a) a 3(d), estas geometrias têm as principais características da geometria tridimensional, no entanto, a relação de áreas é substancialmente diferente. A relação entre a área correspondente à superfície livre e a área das secções adjacentes às turbinas é de 9,62 para 1 na geometria bidimensional, enquanto que na geometria tridimensional é de 30,08 para 1. Pela mesma razão, o efeito de obstrução, provocado no escoamento pela placa deflectora, é maior na geometria bidimensional do que na tridimensional.



As geometrias apresentadas nas figuras 3(a) a 3(d) diferem pela presença ou não da placa deflectora e das divisórias na região inferior do domínio. Para a geometria apresentada na Fig. 3(a) testaram-se 2 malhas, uma com cerca de $3,2 \times 10^4$ elementos e outra com cerca de $8,3 \times 10^4$ elementos. A comparação dos resultados numéricos obtidos para as duas malhas permitiu concluir que a solução obtida para a malha com $3,2 \times 10^4$ elementos é já independente da malha, permitindo efectuar os cálculos mais rapidamente e sem perda significativa de precisão. As malhas para as geometrias apresentadas nas figuras 3(b) a 3(d) têm cerca de 4×10^4 elementos [17-18].

As geometrias definidas anteriormente tinham por objectivo obter a caracterização do escoamento de ar na câmara hidropneumática. Tendo por objectivo avaliar a influência que diferentes técnicas têm na solução obtida, considerou-se uma geometria bidimensional mais simplificada. Para esta geometria consideraram-se várias configurações, figuras 3(e) e 3(f). A câmara pneumática é simétrica, com uma única turbina colocada simetricamente no topo da mesma. As dimensões são semelhantes às das geometrias anteriores [20].

Na figura 3(e) apresentam-se três configurações: a configuração 5-2D é a de menor dimensão e está compreendida entre os planos $y = 2$ m e $y = 16$ m; a configuração 6-2D está compreendida entre os planos $y = -3$ m e $y = 16$ m; a configuração 7-2D corresponde a todo o domínio apresentado na figura. As correspondentes malhas de discretização, geradas de forma semelhante às das configurações 1-2D a 4-2D, têm aproximadamente: $2,5 \times 10^4$ elementos (5-2D); 9×10^4 elementos (6-2D); e $9,8 \times 10^4$ elementos (7-2D).

Na figura 3(f) apresentam-se as restantes três configurações: a configuração 8-2D é a de menor dimensão e corresponde, relativamente à 7-2D, a aumentar até $y = 2$ m a dimensão vertical do domínio no exterior da câmara hidropneumática; na configuração 9-2D, relativamente à 8-2D, prolonga-se o domínio no exterior da câmara até $y = -10$ m (profundidade do fundo no local) e até $x = -58$ m, a dimensão horizontal deste domínio exterior corresponde a aproximadamente meio comprimento de uma onda com período igual a 10 s; a configuração 10-2D é igual à 9-2D com excepção do arredondamento das arestas na entrada da câmara, o raio de curvatura é de 1 m numa parede com 3 m de espessura. As correspondentes malhas de discretização, geradas de forma semelhante às da configuração 7-2D, têm aproximadamente: $1,07 \times 10^5$ elementos (8-2D); $1,95 \times 10^5$ elementos (9-2D); e $1,28 \times 10^5$ elementos (10-2D). Estas geometrias permitem avaliar a influência que a forma da abertura tem no escoamento e na forma da superfície livre dentro da câmara hidropneumática.

3. RESULTADOS

3.1 Simulações tridimensionais

Tomando como referência resultados numéricos obtidos considerando 16×9 m² para a área da superfície livre da água no interior da câmara pneumática [27], assumiu-se um caudal de ar de 120 m³s⁻¹ em cada turbina. As simulações apresentadas nesta secção correspondem exclusivamente a escoamentos de ar, a secção correspondente à superfície livre ($z = 2$ m) é tratada como uma fronteira de entrada/saída de ar.

3.1.1 Dependência da solução

Para verificar a dependência da solução obtida com: o refinamento da malha, o esquema de interpolação e o modelo de turbulência utilizados, foi feita a comparação de distribuições de componentes da velocidade em planos relevantes do domínio de cálculo, para a configuração 1-3D. Tendo em linha de conta que a qualidade do escoamento nas condutas de ligação às turbinas é um factor primordial para o bom rendimento destas, apresentam-se na figura 4, comparações da componente vertical da velocidade, W , por ser a mais relevante, numa secção da conduta de ligação à turbina T1 [16,19].

Estas simulações foram efectuadas em regime estacionário para escoamento de ar ascendente. Na superfície $z = 2$ m, foi imposta uma distribuição uniforme da velocidade: componente vertical, $W_{in} = 1,77$ ms⁻¹, correspondente a um caudal de ar ascendente de 240 m³s⁻¹ nessa superfície; componentes no plano horizontal, $U_{in} = V_{in} = 0$; energia cinética turbulenta $k_{in} = 0,012$ m²s⁻²; e a taxa de dissipação $\epsilon_{in} = 0,003$ m²s⁻³. As condições de fronteira

na secção correspondente à superfície livre influenciam as características do escoamento na câmara pneumática, mas têm pouca influência sobre as características no escoamento nas secções das turbinas [20]. Por esta razão podem-se assumir valores arbitrários razoáveis para k e ε nesta fronteira. Nas secções a montante das turbinas é imposta a pressão atmosférica padrão (1.013×10^5 Pa). A queda de pressão nas turbinas e nas condutas de ligação ao exterior não é considerada. Assume-se esta simplificação porque, no presente estudo, a evolução da pressão dentro da câmara não é relevante.

Constatou-se, Fig. 4(a), que a qualidade das soluções obtidas com as malhas II, III e IV é muito similar, sendo a obtida com a malha I a mais pobre. Pode-se concluir que se podem obter soluções independentes da malha com malhas relativamente grosseiras. Os diferentes esquemas de interpolação utilizados originam soluções bastante similares, Fig. 4(b). Os esquemas QUICK e LUDS apresentam soluções com menor difusão do que os esquemas de ordem inferior (UDS e PLDS), como seria de esperar. O estudo de dependência com o modelo de turbulência, cuja figura não se apresenta, mostrou que as soluções obtidas pelos modelos de turbulência $k-\varepsilon$ padrão, RNG e realizável são muito similares. Por esta razão nas restantes simulações utilizaram-se o esquema QUICK e o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão [16,19].

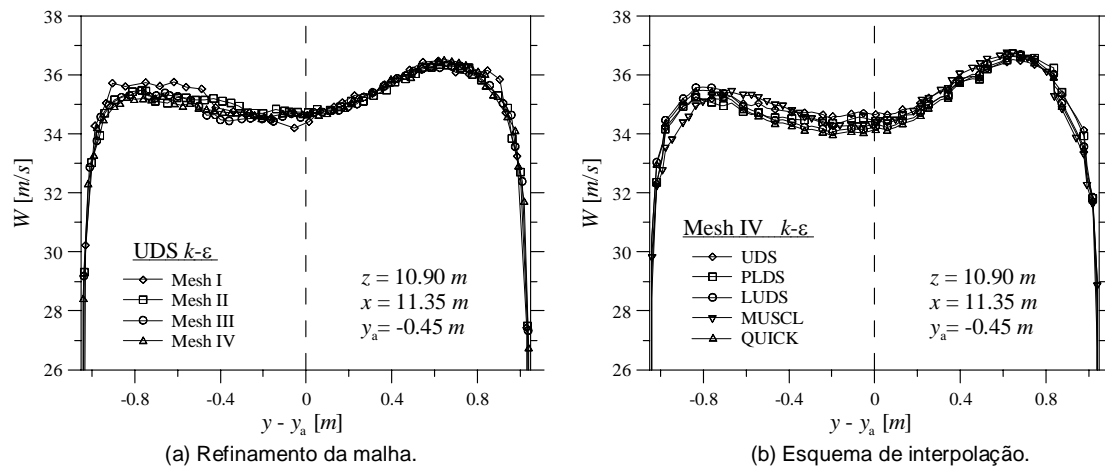


Fig. 4. Configuração 1-3D: convergência da solução (escoamento estacionário ascendente).

3.1.2 Escoamento estacionário descendente

Para avaliar o risco de produção de *spray* na superfície livre pelo escoamento de ar descendente efectuaram-se simulações para as quatro geometrias tridimensionais [19,21]. Foi imposto no plano $z = 2$ m: $W_{out} = -1,77 \text{ ms}^{-1}$ e $U_{out} = V_{out} = 0$.

A observação das figuras 5(a) permite constatar que, para a configuração 1-3D, o módulo da velocidade sobre o plano $z = 2$ m, correspondente à superfície livre, atinge valores da ordem de 10 ms^{-1} . Esta configuração pode ser prejudicial para o bom funcionamento das turbinas, uma vez que estes valores elevados da velocidade podem originar a produção de *spray* que passará pelas turbinas na fase ascendente do ciclo [28-30]. A inclusão de uma placa deflectora sob as condutas das turbinas, configuração 2-3D, dá origem a velocidades mais baixas (cerca de 5 m/s) junto à superfície livre, como se pode constatar pela Fig. 5(b). Estes valores mais baixos da velocidade já serão insuficientes para a produção de *spray*. Os resultados favoráveis obtidos para a configuração 2-3D sugeriram a utilização de uma placa deflectora de menores dimensões, configuração 3-3D. No entanto, devido às arestas arredondadas desta placa, a velocidade atinge valores acima de $12,5 \text{ ms}^{-1}$ próximo da superfície livre, Fig. 5(c). Para resolver os problemas originados pela configuração 3-3D utilizou-se uma placa de maiores dimensões ligeiramente descentrada em relação aos eixos das turbinas, configuração 4-3D. Os valores do módulo da velocidade, Fig. 5(d), são inferiores a 5 ms^{-1} próximo da superfície livre. Consequentemente, a configuração final apresenta condições favoráveis que se esperam ser suficientes para inibir a produção de *spray*. Para estas configurações constatou-se uma igual

distribuição dos caudais através das condutas das turbinas.

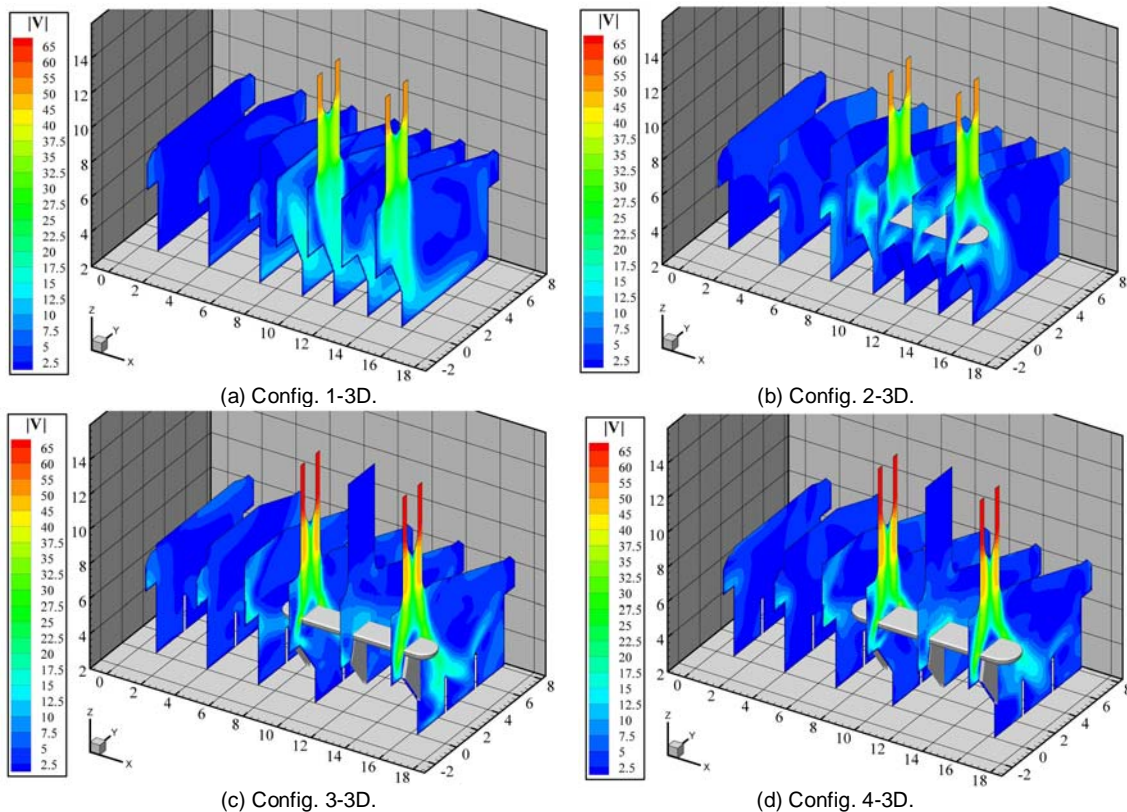


Fig. 5. escoamento estacionário descendente: distribuição do módulo da velocidade (em m/s).

3.1.3 Escoamento estacionário ascendente

A figura 6 apresenta a distribuição das componentes da velocidade numa secção a montante das turbinas. As condições de simulação são iguais às definidas para as simulações apresentadas na secção 3.1.1.

Para as quatro configurações, as distribuições de W são quase uniformes. O desvio à uniformidade é de 4 % para a configuração 1; 5 % para a configuração 2; e 4 % para as configurações 3 e 4. Estas distribuições mostram também uma igual subdivisão do caudal escoado pelas duas turbinas. A comparação das distribuições de U e V com a distribuição de W permite concluir que os valores de U/W e V/W são, no máximo 5 % para a configuração 1; 9 % para a configuração 2; e 4 % para as configurações 3 e 4. Os valores de U/W e V/W são maiores na conduta da turbina 2. Isto indica que a rotação do escoamento nesta conduta é superior ao da conduta 1, o que é devido à conduta 2 estar mais próxima de um dos cantos da câmara pneumática. A perturbação no escoamento originada pela placa deflectora não tem influência na uniformidade do escoamento imediatamente a montante das turbinas. O escoamento é suficientemente uniforme, com pequena componente tangencial, providenciando boas condições de entrada nas turbinas [19,21].

3.1.4 Escoamento periódico

Para a configuração 2-3D foi efectuada uma simulação de escoamento de ar periódico bidireccional. Para a componente vertical da velocidade, no plano $z = 2$ m, foi imposta uma função sinusoidal: $W = 1,77 \sin(2 \pi t / T)$, com um período de onda típico $T = 10$ s; $U = V = 0$; $k = 0,00375 W^2$; e $\varepsilon = 2,347 k^{3/2}$ [19,21]. Esta função é equivalente à velocidade de deslocação da superfície livre da água com uma amplitude de 2,82 m, *i.e.*, uma altura de onda igual a 5,64 m. Esta evolução corresponde a uma condição de funcionamento severa, a altura significativa da onda no local é de 1,8 m no Inverno [15,22], logo esta simulação corresponde a

condições de funcionamento muito mais exigentes, embora possíveis, do que aquelas que ocorrem em média.

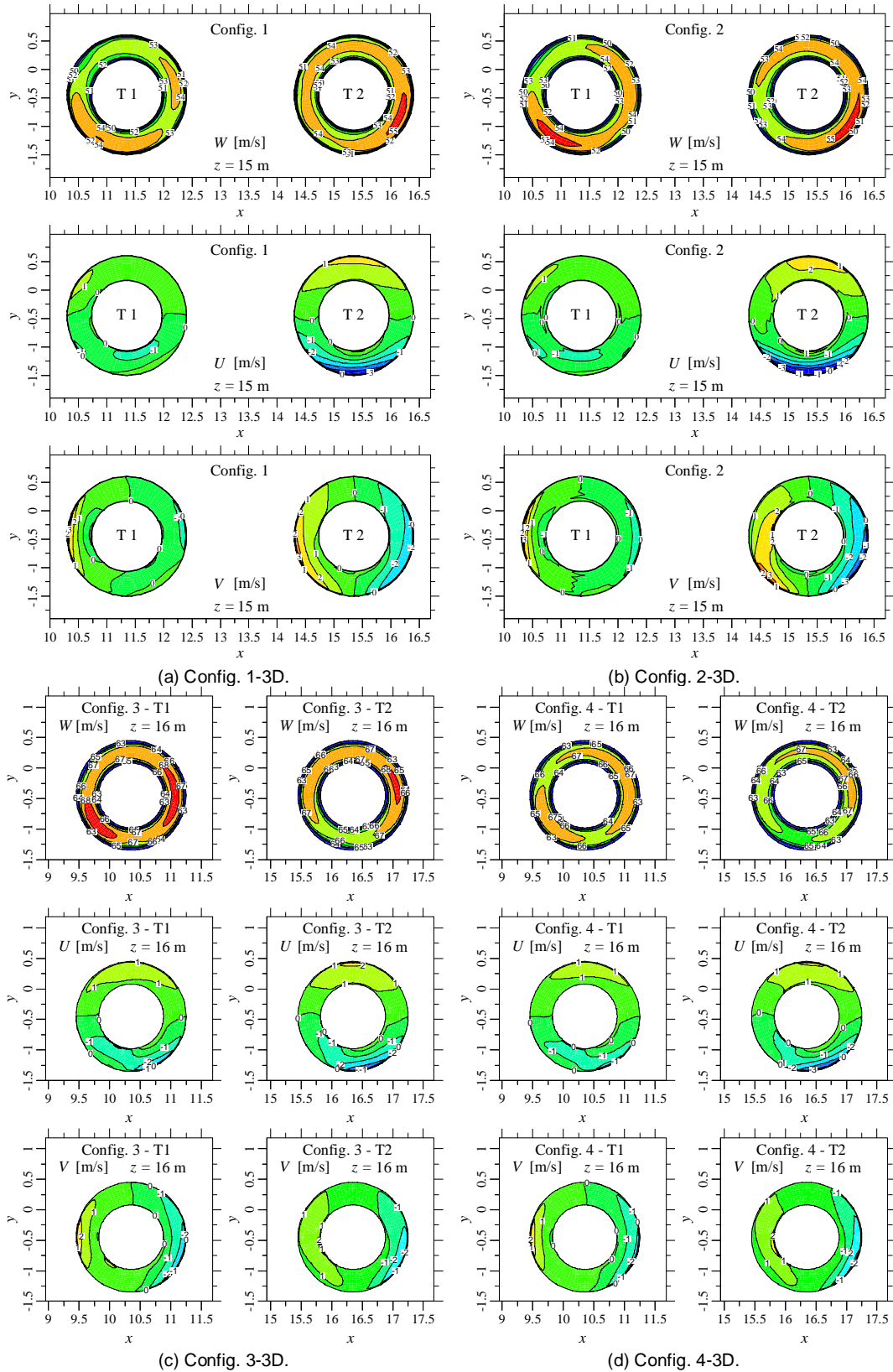


Fig. 6. Escoamento estacionário ascendente: distribuição das componentes da velocidade numa secção a montante da turbina.

A figura 7(a) apresenta a evolução temporal das componentes verticais da velocidade, no plano $z = 2$ m, e da força aerodinâmica sobre a placa deflectora. As diferenças entre as porções da curva para cada período relativamente ao quarto período mostram que a evolução temporal pode ser assumida como periódica após 3 períodos. Esta simulação foi efectuada num PC com um processador Pentium IV a 3.2 GHz com 2 Gbytes de memória RAM e com sistema operativo Windows XP. O tempo de cálculo foi tipicamente de 40 min por passo de tempo de 0,01 s [19,21].

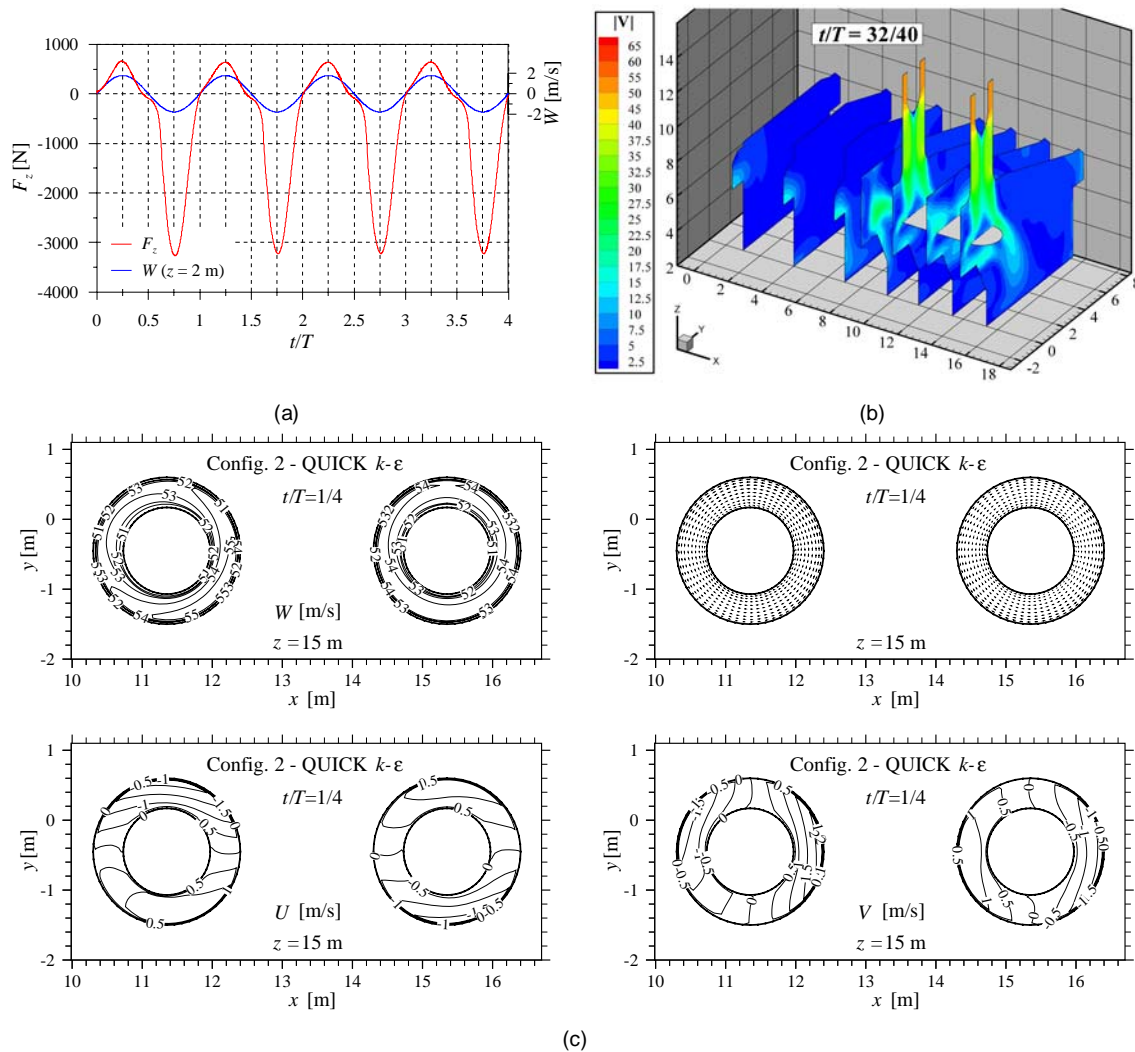


Fig. 7. Escoamento periódico (Config. 2-3D): (a) Evolução temporal de W no plano $z = 2$ m e da componente vertical da força aerodinâmica sobre a placa deflectora; (b) Distribuição do módulo da velocidade em planos $y-z$ (em m/s); (c) Campo e componentes da velocidades no plano a montante das turbinas.

O valor máximo da velocidade no sentido descendente, imposta em $z = 2$ m, ocorre no instante $t/T = 3/4$, no entanto, devido à inércia do escoamento, a velocidade máxima sobre a superfície livre ocorre após $t/T = 1/20 = 0,5$ s. O escoamento próximo da superfície livre para escoamento estacionário, Fig. 5(b), é semelhante ao que ocorre no instante $t/T = 32/40$, Fig. 7(b), o que sugere a possibilidade de avaliar as velocidades máximas que ocorrem nas imediações da superfície livre num escoamento periódico pela análise de uma simulação em regime estacionário [19,21]. A distribuição de W no instante $t/T = 1/4$, Fig. 7(c) não difere muito da obtida para a simulação ascendente em regime estacionário, Fig. 6(b). As componentes transversais, por seu lado, apresentam valores inferiores aos obtidos para a simulação em regime estacionário. Estes resultados sugerem novamente a possibilidade de avaliar as condições extremas que ocorrem na câmara pneumática num escoamento periódico pela

análise de simulações em regime estacionário ascendente e descendente. Este é um escoamento tridimensional muito complexo, apresentando múltiplas bolhas de recirculação em diferentes locais e em diferentes instantes. No entanto, esta complexidade não induz perturbações significativas nas secções de entrada das turbinas.

3.2 Simulações bidimensionais

3.2.1 Configurações 1-2D a 4-2D

A figura 8 apresenta as distribuições do módulo da velocidade e algumas linhas de corrente para as geometrias bidimensionais simplificadas, configurações 1-2D a 4-2D, para escoamento ascendente. A comparação destas figuras com as suas correspondentes na geometria tridimensional permite verificar a existência de uma da bolha de recirculação de maior dimensão na esteira da placa no caso bidimensional. Verifica-se que a inclusão das placas divisórias não perturba significativamente o escoamento ascendente, enquanto que no descendente, cujos resultados não se apresentam neste artigo, se observam modificações significativas na forma das linhas de corrente, tendo como consequência a diminuição da dimensão das bolhas de recirculação no interior da câmara pneumática [17,18].

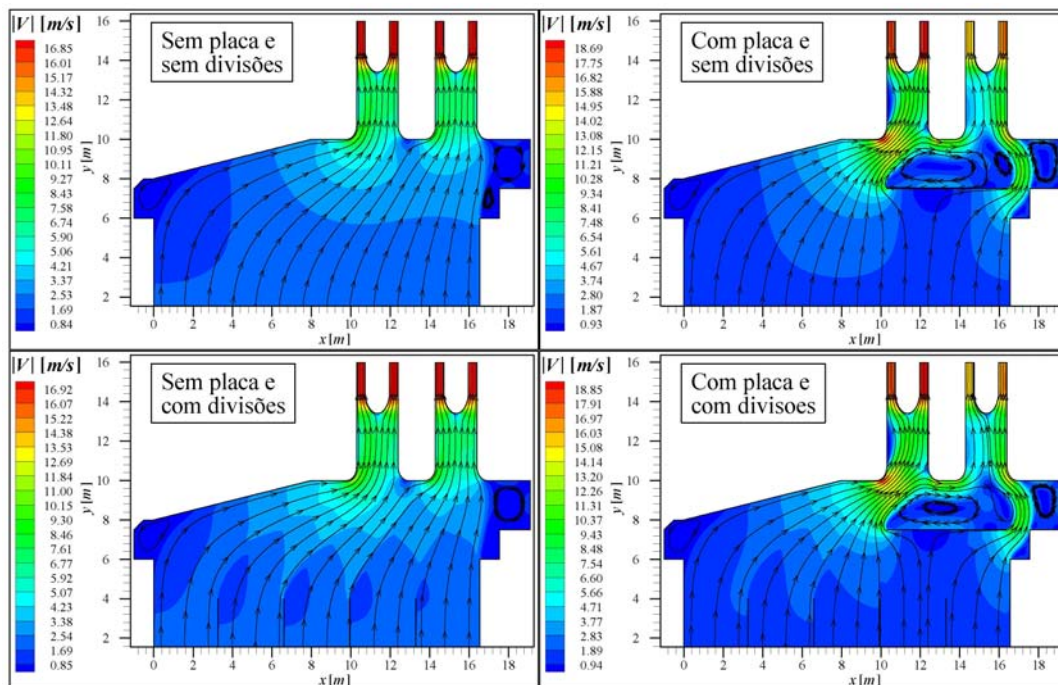


Fig. 8. Geometrias bidimensionais para as configurações 1-2D a 4-2D: distribuição do módulo da velocidade e linhas de corrente (escoamento estacionário ascendente).

No caso tridimensional, o escoamento no interior das condutas que conduzem às turbinas apresenta perfis da componente vertical da velocidade quase uniformes, Fig. 9(a). Por seu lado, na simulação bidimensional verifica-se uma grande assimetria desses perfis e um desequilíbrio entre os caudais que passam pelas duas condutas, Fig. 9(b).

A figura 10 apresenta perfis da componente vertical da velocidade, para alguns instantes de tempo, numa secção nas condutas das turbinas, onde se pode verificar alguma assimetria dos perfis, embora em menor grau do que a que se verifica em regime estacionário, Fig. 9(b). O desequilíbrio entre os escoamentos nas duas condutas é também inferior ao verificado em regime estacionário. Estes resultados indicam que as simulações em regime estacionário para geometrias bidimensionais originam escoamentos mais desfavoráveis do que aqueles que se obtêm nas correspondentes geometrias tridimensionais [17].

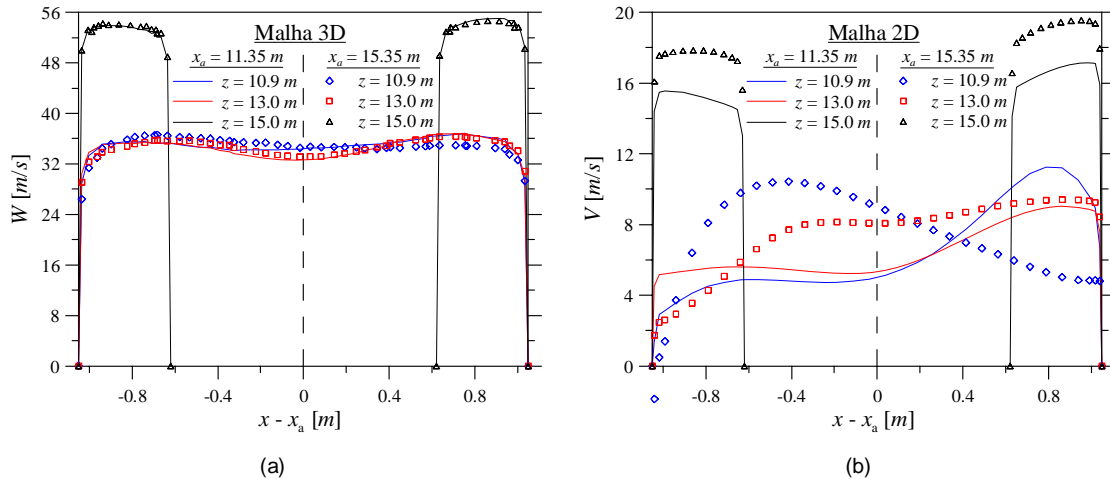


Fig. 9. Perfis da componente vertical da velocidade para as configurações 2-3D (a) e 2-2D (b) em regime estacionário.

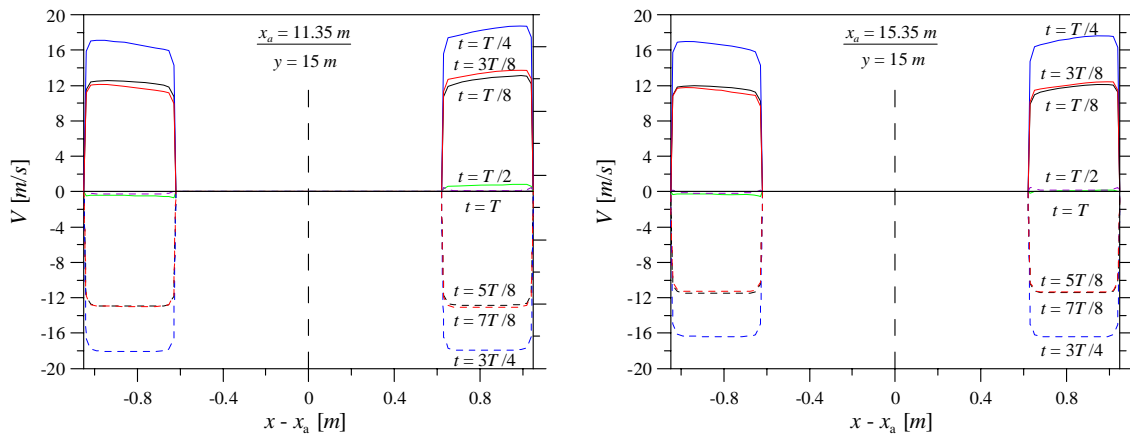


Fig. 10. Perfis da componente vertical da velocidade nas condutas das turbinas para a configuração 2-2D em regime periódico para diferentes instantes de tempo.

3.2.2 Configurações 5-2D a 7-2D

Para a configuração 5-2D efectuaram-se quatro simulações, casos I a IV. Para o caso I é imposto um movimento vertical periódico numa superfície sólida correspondente à superfície livre média ($y = 2$ m), utilizando uma técnica de malha dinâmica que consiste em acrescentar ou subtrair camadas de elementos de tamanho variável [23]. A componente vertical da velocidade é igual a $V = a \cos(2\pi t / T)$, com $a = 1,5$ m/s e $T = 10$ s, esta função dá origem a uma amplitude de movimento igual a 2,4 m, ligeiramente inferior aos casos simulados nas configurações anteriormente apresentadas. Para os casos II, III e IV foi imposta uma condição de fronteira aberta de entrada ou saída de ar na superfície $y = 2$ m. Para o caso II utilizou-se a mesma função para produzir uma evolução periódica da velocidade vertical do ar. Para os casos III e IV assumiu-se escoamento estacionário com, respectivamente, $V = a$ e $V = -a$. No caso V, correspondente à utilização da configuração 6-2D, é imposto o mesmo movimento vertical periódico numa superfície sólida em $y = -3$ m. Para o caso VI, correspondente à utilização da configuração 7-2D, é imposto um movimento horizontal periódico à superfície sólida $x = -16$ m com $a = 5$ m/s, este movimento periódico horizontal dá origem ao mesmo caudal deslocado que o caso V. Nos casos V e VI o volume até $y = 2$ m está preenchido com água, sendo a evolução da superfície livre obtida pela resolução da equação VoF. A energia cinética turbulenta, a sua taxa de dissipação e a pressão estática nas fronteiras são impostos da mesma forma que nos casos anteriores [20].

A figura 11 apresenta a distribuição de V , k e ε no eixo de simetria da câmara pneumática ($x = 0$) e na secção de entrada da turbina ($y = 16$ m), para o escoamento ascendente. Com

excepção do caso III, todas as soluções apresentam um comportamento semelhante, o que mostra que este escoamento tem grande variabilidade no tempo. As diferenças entre as restantes curvas tendem a desaparecer para cotas superiores a $y = 9$ m. O escoamento na parte inferior da câmara hidropneumática é muito dependente da condição de fronteira imposta na secção $y = 2$ m, tanto para o escoamento na fase ascendente como na fase descendente [20]. Concluiu-se deste estudo que a caracterização no escoamento nas secções da turbina não dependem muito das condições de fronteira utilizadas na zona da superfície livre. No entanto, para obter uma correcta caracterização do escoamento no interior da câmara devem-se utilizar geometrias e condições de fronteira mais próximas das condições do escoamento real.

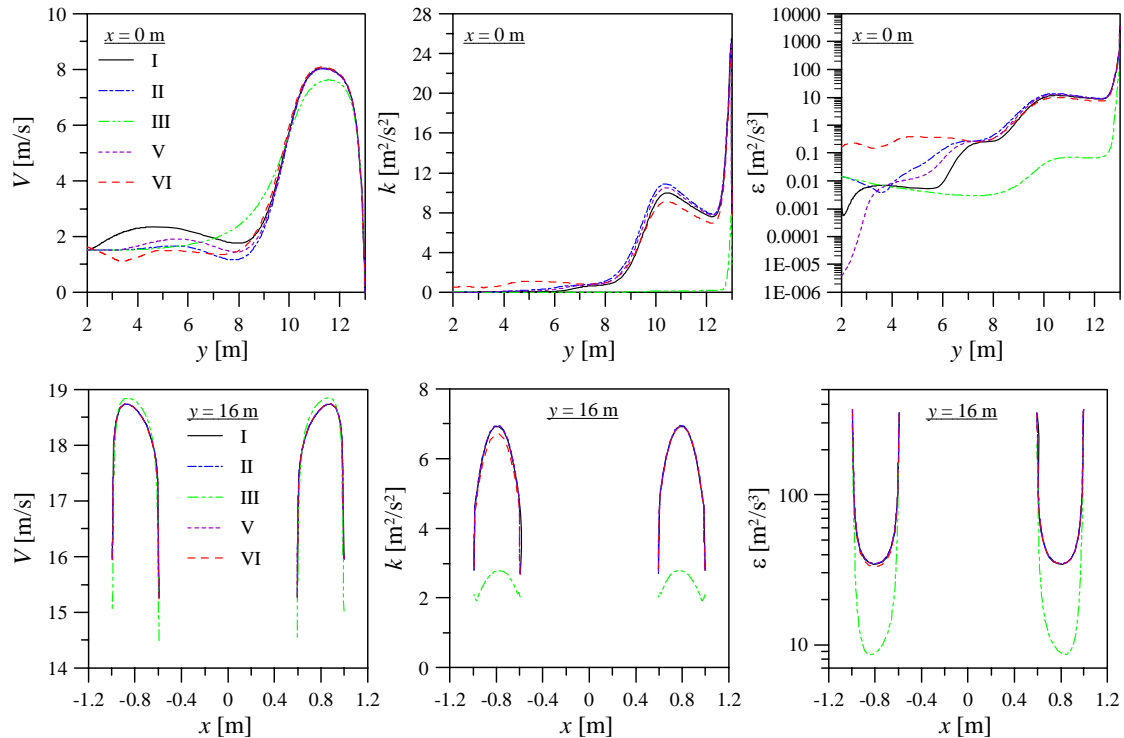


Fig. 11. Perfis da componente vertical da velocidade, de k e de ε para as configurações 5-2D a 7-2D, casos I a VI, para o escoamento ascendente.

3.2.3 Configurações 8-2D a 10-2D

Para o caso VII, correspondente à utilização da configuração 8-2D, é imposto um movimento horizontal periódico à superfície sólida $x = -16$ m com $a = 1,875$ m/s. Para os casos VIII e IX é imposto um movimento horizontal periódico à superfície sólida $x = -58$ m com $a = 1,25$ m/s. Estes movimentos periódicos horizontais dão origem ao mesmo caudal deslocado que os casos V e VI. Tal como nos casos V e VI, para os casos VII, VIII e IX o volume até $y = 2$ m está preenchido com água, sendo a evolução da superfície livre obtida pela resolução da equação VoF. A energia cinética turbulenta, a sua taxa de dissipação e a pressão estática nas fronteiras são impostas da mesma forma que nos casos anteriores. Em todos os casos apresentados não foi simulada a propagação das ondas, a superfície $y = 2$ m no exterior da câmara hidropneumática é uma superfície sólida. Todo o caudal deslocado pelo êmbolo é forçado a entrar no interior da câmara.

As figuras 13 e 14 apresentam a distribuição de c , utilizada para identificar a superfície livre, no domínio para os casos VI a IX em quatro instantes de um ciclo. A figura 15 apresenta a distribuição do módulo da velocidade e linhas de corrente na proximidade da entrada de água na câmara hidropneumática, para os casos VI a IX, no instante de maior velocidade de entrada de água.

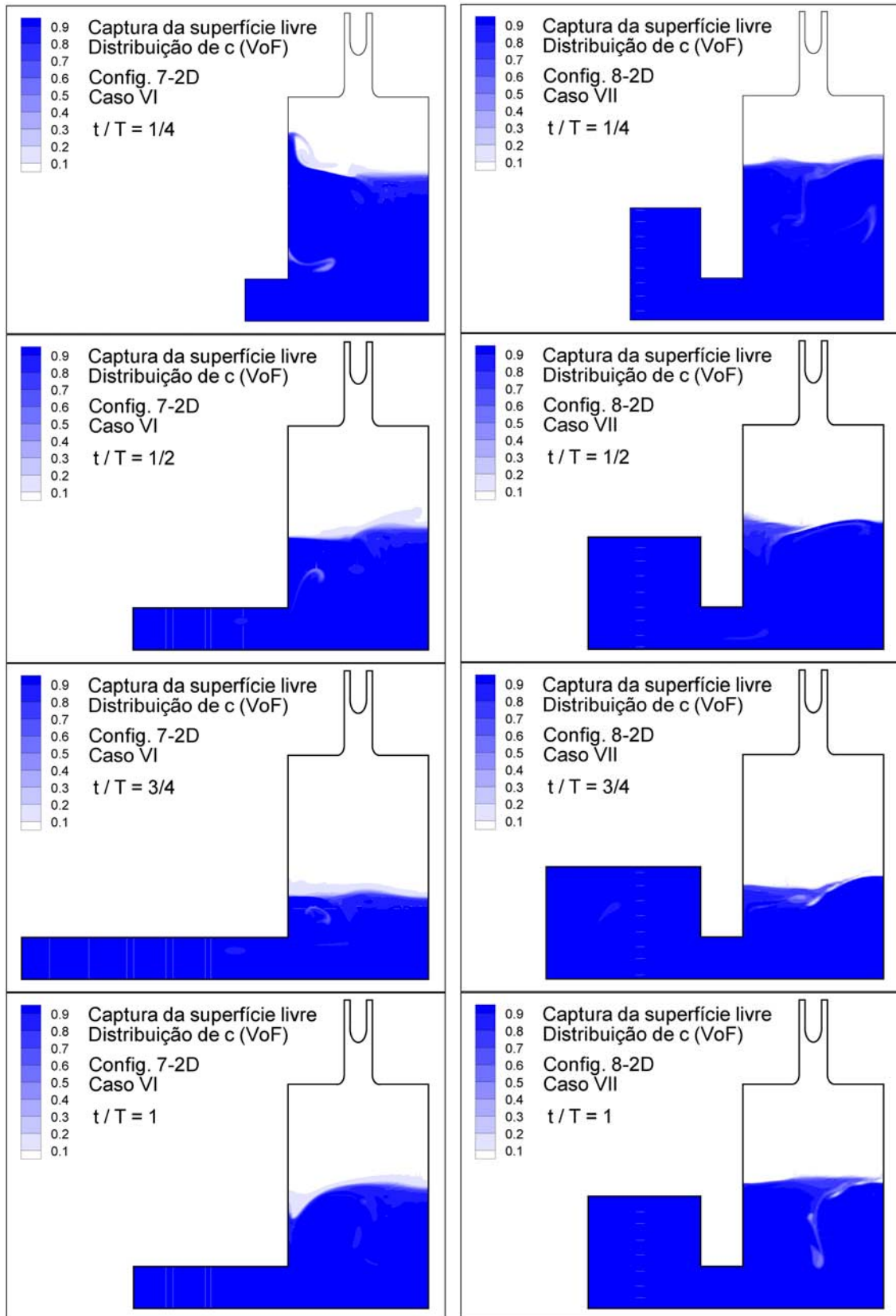


Fig. 12. Captura da superfície livre, distribuição de c (VoF) para as configurações 7-2D e 8-2D, em quatro instantes de um ciclo.

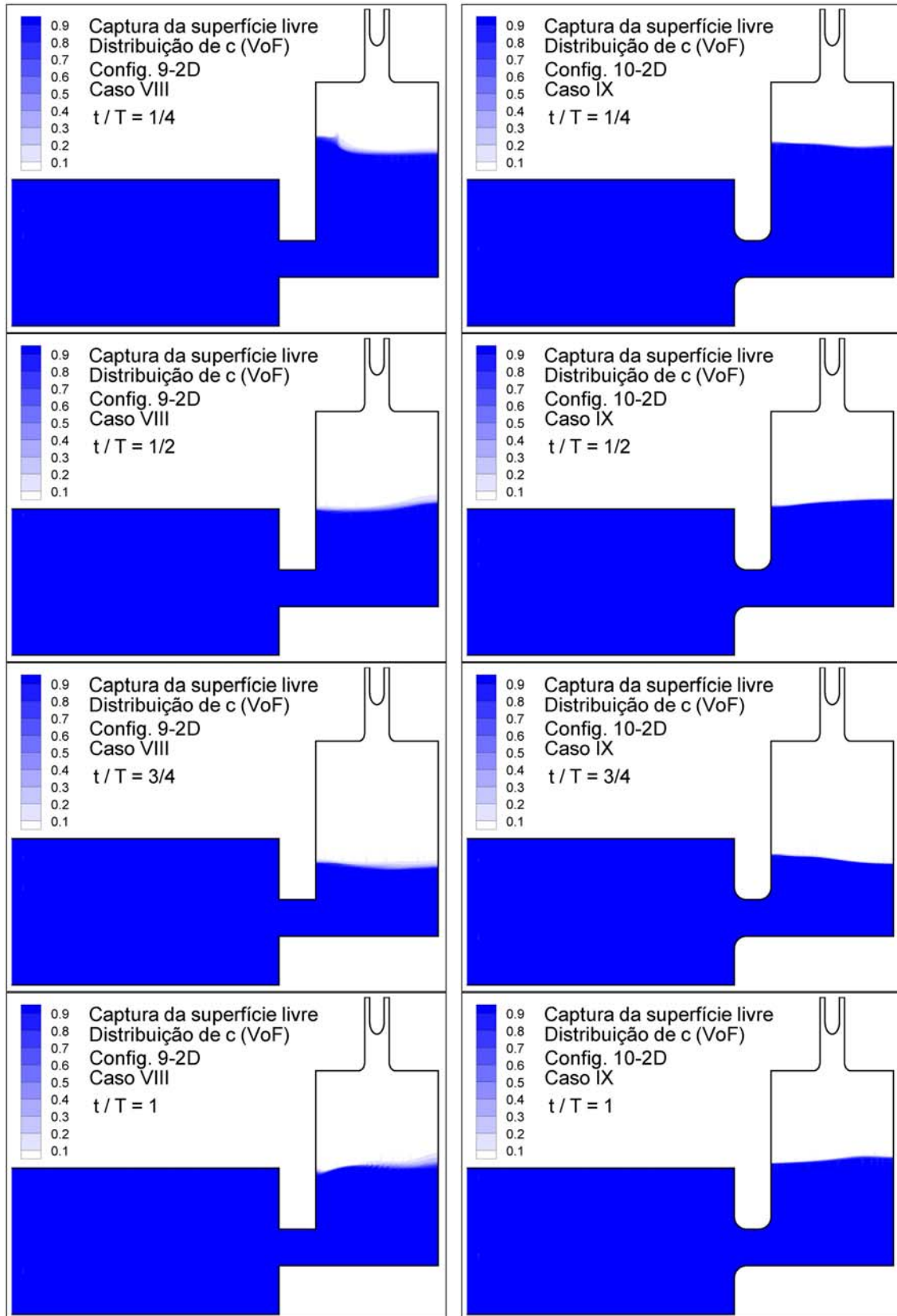


Fig. 13. Captura da superfície livre, distribuição de c (VoF) para as configurações 9-2D e 10-2D, em quatro instantes de um ciclo.

A observação destas figuras permite concluir que, para a configuração 7-2D, a superfície livre apresenta grandes deformações e oscilações que são consequência da forma do domínio no exterior da câmara. No instante de maior velocidade o escoamento no exterior dá origem a um jacto de água com grande velocidade que ao entrar na câmara origina uma bolha de recirculação de grande intensidade, cuja influência se transmite à superfície livre dentro da câmara. A influência deste jacto manifesta-se tanto na entrada como na saída de água da câmara.

À medida que se aumenta a dimensão vertical do domínio exterior à câmara, mantendo a mesma espessura da parede e altura da abertura, as bolhas de recirculação vão perdendo a intensidade, casos VII e VIII, e como consequência a superfície livre dentro da câmara vai apresentar menores deformações e oscilações.

A eliminação das bolhas de recirculação nas arestas da entrada é conseguida arredondando as arestas, configuração 10-2D. Para o caso IX a superfície livre apresenta um comportamento mais estável do que para os outros casos.

Estas geometrias permitiram avaliar a influência que a forma do domínio exterior e da abertura tem no escoamento e na forma da superfície livre dentro da câmara hidropneumática. Para uma correcta simulação do escoamento dentro da câmara a forma do domínio no exterior a esta deve ser o mais aproximada possível à geometria real.

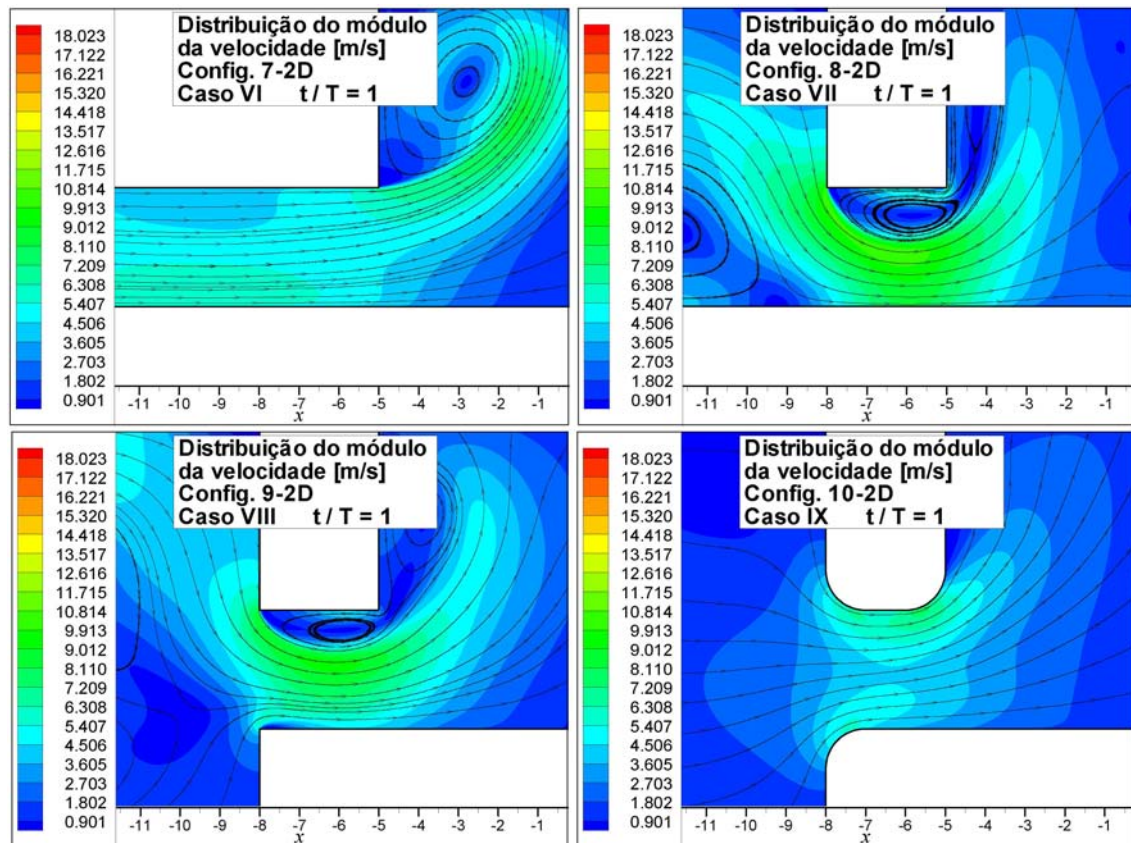


Fig. 14. Distribuição do módulo da velocidade e linhas de corrente na proximidade da entrada de água na câmara hidropneumática, para as configurações 7-2D a 10-2D, no instante de ocorrência da maior velocidade de entrada de água.

4. CONCLUSÕES

Neste artigo apresentaram-se os diversos estudos numéricos efectuados com vista à caracterização do escoamento numa câmara hidropneumática da central de aproveitamento de energia das ondas proposta para instalação no molhe norte na barra do Douro. Esta central, do tipo coluna de água oscilante, é composta de duas câmaras hidropneumáticas, cada uma equipada com duas turbinas de eixo vertical, dispostas



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

assimetricamente no topo da câmara. Descreveram-se neste artigo as diferentes simulações numéricas efectuadas, considerando diferentes hipóteses simplificadoras e diferentes geometrias. Estas simulações foram efectuadas com o código numérico comercial FLUENT 6.2.16.

O primeiro estudo efectuado teve por objectivo verificar a dependência da solução obtida com: o refinamento da malha, o esquema de interpolação e o modelo de turbulência utilizados. Tendo em linha de conta que a qualidade do escoamento nas condutas de ligação às turbinas é um factor primordial para o bom rendimento destas, é necessário estudar com rigor o escoamento nestas. Estas simulações foram efectuadas para escoamento de ar ascendente na geometria tridimensional original em regime estacionário. Constatou-se que se podem obter soluções independentes da malha com malhas relativamente grosseiras. Os diferentes esquemas de interpolação utilizados originam soluções bastante similares. Os esquemas QUICK e LUDS apresentam soluções com menor difusão do que os esquemas de ordem inferior (UDS e PLDS), como seria de esperar. O estudo de dependência com o modelo de turbulência mostrou que as soluções obtidas pelos modelos de turbulência $k-\varepsilon$ padrão, RNG e realizável são muito similares. Por esta razão nas restantes simulações utilizaram-se o esquema QUICK e o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão.

Para avaliar o risco de produção de *spray* na superfície livre pelo escoamento de ar descendente efectuaram-se simulações para quatro geometrias tridimensionais. Para a geometria original, constatou-se a possibilidade de ocorrência de velocidades tangenciais elevadas próximo da superfície livre, que podem originar a produção de *spray* que passará pelas turbinas na fase ascendente do ciclo. Por esta razão a configuração original da câmara CAO poderá ser prejudicial para o bom funcionamento das turbinas. Propuseram-se três geometrias modificadas, utilizando uma placa deflectora (diferente para cada configuração) sob as condutas das turbinas para reduzir a produção de *spray* no escoamento descendente. Verificou-se que duas destas configurações são bastante eficazes.

Para o escoamento ascendente estacionário, nas quatro configurações tridimensionais estudadas, as distribuições da componente vertical da velocidade são quase uniformes, com pequena componente tangencial, providenciando boas condições de entrada nas turbinas. A perturbação no escoamento originada pela placa deflectora não tem influência na uniformidade do escoamento imediatamente a montante das turbinas. Para estas configurações constatou-se uma igual distribuição dos caudais através das condutas das turbinas para os escoamentos ascendente e descendente.

As simulações em regimes estacionário apresentadas representam apenas os dois estados de maior velocidade, ascendente e descendente, do escoamento real. Estas simulações diferem da solução real periódica devido a efeitos de inércia e de bloqueamento. A simulação em regime periódico sugere a possibilidade de avaliar as condições extremas que ocorrem na câmara pneumática num escoamento periódico, pela análise de simulações em regime estacionário ascendente e descendente. A complexidade do escoamento tridimensional não induz perturbações significativas nas secções de entrada das turbinas.

As simulações numéricas em regime variável no tempo apresentam uma dificuldade acrescida: o tempo de cálculo para as geometrias tridimensionais complexas, com malhas de discretização compostas por mais de 10^6 elementos, pode-se tornar incomportável, atendendo à necessidade de apresentar resultados em curto espaço de tempo, como é prática corrente em problemas de engenharia. A utilização de geometrias bidimensionais simplificadas pode ser uma alternativa às geometrias tridimensionais, uma vez que os tempos de cálculo para as geometrias bidimensionais são substancialmente inferiores aos verificados para as geometrias tridimensionais. Esta abordagem simplista de um problema complexo deve ser feita com alguns cuidados e as conclusões que se retirarem não poderão ser extrapoladas directamente para o escoamento na geometria tridimensional. De um modo geral, para as geometrias analisadas, as simulações em regime estacionário para geometrias bidimensionais originam escoamentos mais desfavoráveis do que aqueles que se obtêm nas correspondentes geometrias tridimensionais. Enquanto que para regime variável no tempo as assimetrias dos perfis são menores do que a que se verificam em regime estacionário.

Concluiu-se também que a caracterização do escoamento nas secções da turbina não



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

dependem muito das condições de fronteira utilizadas na zona da superfície livre. No entanto, para obter uma correcta caracterização do escoamento no interior da câmara devem-se utilizar geometrias e condições de fronteira mais próximas das condições do escoamento real.

A utilização de aberturas de entrada de água na câmara com arestas arredondadas permite estabilizar mais o escoamento de água no interior da câmara hidropneumática do que quando se utilizam arestas vivas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente apoiado pela Agencia da Inovação e pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, com o apoio do Fundo Europeu Regional, através do programa POCTI (Projectos POCTI-IDEA 130203 FDR-01293 e POCTI/EME/59024/2004).

REFERÊNCIAS

1. J.M.B.P. Cruz e A.J.N.A. Sarmiento, *Energia das ondas. Introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais*, Instituto do Ambiente, Alfragide, 2004.
2. J. Falnes, *Ocean Waves and Oscillating Systems. Linear Interactions Including Wave-Energy Extraction*, Cambridge University Press, 2002.
3. A. Clément, P. McCullen, A.F. de O. Falcão, A. Fiorentino, F. Gardner, K. Hammarlund, G. Lemonis, T. Lewis, K. Nielsen, S. Petroncini, M.T. Pontes, P. Schild, B.-O. Sjöström, H.C. Sorensen and T. Thorpe, Wave Energy in Europe: Current Statues and Perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, pp. 405-431, 2002.
4. A.W. Lewis, T. Gilbaud and B. Holmes, Modelling the Backward Bent Duct Device – B2D2: A Comparison between Physical and Numerical Models. *Proc. 5th European Wave Energy Conference*, Cork, Ireland, pp. 54-58, 2005.
5. A.F. de O. Falcão and R.J.A. Rodrigues, Stochastic Modelling of OWC Wave Power Plant Performance. *Applied Ocean Research*, vol. 24, pp. 59-71, 2002.
6. A. Brito-Melo, L.M.C. Gato and A.J.N.A. Sarmiento, Analysis of Wells Turbine Design Parameters by Numerical Simulation of the OWC Performance. *Ocean Engineering*, vol. 29/12, pp. 1463-1477, 2002.
7. L.M.C. Gato and A.F. de O. Falcão, Aerodynamics of Wells turbine. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 30, no. 6, pp. 383-395, 1988.
8. M. Folley, R. Curran and T. Whittaker, Comparison of LIMPET Contra-Rotating Wells Turbine with Theoretical and Model Test Predictions. *Ocean Engineering*, vol. 33, pp. 1056-1069, 2006.
9. T. Setoguchi and M. Takao, Current Status of Self Rectifying Air Turbines for Wave Energy Conversion. *Energy Conversion and Management*, vol. 47, pp. 2382-2396, 2006.
10. T. Setoguchi, S. Santhakumar, H. Maeda, M. Takao and K. Kaneko, A Review of Impulse Turbines for Wave Energy Conversion. *Renewable Energy*, vol. 23, pp. 261-292, 2001.
11. A. Thakker and F. Hourigan, Modeling and Scaling of the Impulse Turbine for Wave Power Applications. *Renewable Energy*, vol. 29, pp. 305-317, 2004.
12. A. Thakker and F. Hourigan, Computational Fluid Dynamics Analysis of a 0.6 m, 0.6 Hub-to-tip Ratio Impulse Turbine with Fixed Guide Vanes. *Renewable Energy*, vol. 30, pp. 1387-1399, 2005.
13. A. Thakker, F. Hourigan, T.S. Dhanasekaran, M.El. Henry, Z. Usmani and J. Ryan, Design and Performance Analysis of Impulse Turbine for a Wave Energy Power Plant. *International Journal of Energy Research*, vol. 29, pp. 13-36, 2005.
14. J.M. Paixão Conde, L.M.C. Gato e R.P.F. Gomes, Estudo Numérico de uma Turbina Axial Auto-rectificadora de Acção para Aplicação em Centrais de Energia das Ondas. *Proc. 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica*, Cusco, Perú, 2007.
15. E. Martins, F.S. Ramos, L. Carrilho, P.A.P. Justino, L.M.C. Gato, L. Trigo and F. Neumann, CEODOURO Project: Overall Design of an OWC in the New Oporto Breakwater. *Proc. 6th European Wave and Tidal Energy Conference*, Glasgow, U.K., 2005.



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

16. J.M. Paixão Conde and L.M.C. Gato, Numerical Study of the Air-Flow in an Oscillating Water Column Wave Energy Converter. *Proc. Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'06), 13th International Conference on Fluid Flow Technologies*, Budapest, Hungary, 2006.
17. J.M. Paixão Conde, E. Didier e L.M.C. Gato, Simulação Numérica de Escoamentos Periódicos: Escoamento na Câmara Pneumática de uma Central de Energia das Ondas de Coluna de Água Oscilante. *Proc. Conferência Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica*, FCT-UNL, Monte da Caparica, Portugal, 2006.
18. A. Tiago, B. Lopes, H. Mota e J.M. Paixão Conde, Simulação Numérica do Escoamento na Câmara Pneumática de uma Central de Energia das Ondas de Coluna de Água Oscilante. *Proc. Jornadas do Mar 2006 – OS OCEANOS: Uma Plataforma para o Desenvolvimento*, Escola Naval, Portugal, 2006.
19. J. M. Paixão Conde. CEODOURO – Simulações Numéricas do Escoamento de Ar numa Câmara Pneumática de uma Central de Aproveitamento de Energia das Ondas de Coluna de Água Oscilante, Relatório interno, IDMEC-IST, 2006.
20. J.M. Paixão Conde and L.M.C. Gato, Numerical Study of the Flow in an Oscillating Water Column Wave Energy Converter: Comparison of Different Solution Techniques. *Proc. International Conference on Computational Methods in Marine Engineering (MARINE 2007)*, Barcelona, Spain, 2007.
21. J.M. Paixão Conde and L.M.C. Gato, Design of a Baffle-plate for an OWC-WEC Equipped with Vertical-axis Air-turbines: Numerical Study of the Air-flow. *Proc. 7th European Wave and Tidal Energy Conference*, Porto, Portugal, 2007.
22. F.S. Ramos, Integração de uma Central de Aproveitamento da Energia das Ondas nos Molhes do Douro. *Proc. 4as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Angra do Heroísmo*, Portugal, 2005.
23. Fluent Inc., *FLUENT 6.2 User's Guide*, 2005.
24. Fluent Inc., *GAMBIT 2.2 Modelling Guide*, 2004.
25. Fluent Inc., *GAMBIT 2.2 User's Guide*, 2004.
26. H.K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Longman, 1995.
27. L.M.C. Gato, P.A.P. Justino and A.F. de O. Falcão, Optimization of Power Take-off Equipment for an Oscillating Water Column Wave Energy Plant. *Proc. 6th European Wave and Tidal Energy Conference*, Glasgow, U. K., 2005.
28. E.C. Monahan, C.W. Fairall, K.L. Davidson and P.J. Boyle, Observed Interrelation between 10 m Winds, Ocean Whitecaps and Marine Aerosols. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 109:375-392, 1983.
29. E.L. Andreas, A New Sea Spray Generation Function for Wind Speeds up to 32 m/s. *J. Phys. Oceanogr.*, 28: 2175-2184, 1998.
30. J. Piazzola, P. Forget and S. Despiau, A Sea Spray Generation Function for Fetch-limited Conditions. *Annales Geophysicae*, 20:121-131, 2002.