

OTTIMIZZAZIONE MEDIANTE CFD DI UN DISPOSITIVO OWC PER IL CLIMA ONDOSO MEDITERRANEO

Irene Simonetti¹, Lorenzo Cappiati¹

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale – DICEA, Università degli Studi di Firenze

ASPETTI CHIAVE:

- Il lavoro presenta i risultati di un'ottimizzazione sito-specifica di un dispositivo a colonna d'acqua oscillante (OWC) per la conversione dell'energia del moto ondoso
- Lo strumento utilizzato è un canale marittimo virtuale basato sulla CFD e validato con dati sperimentali
- L'efficienza pneumatica del dispositivo raggiunge un massimo dell'80% circa ed è fortemente influenzata dai parametri geometrici

1 INTRODUZIONE

Tra i numerosi dispositivi proposti per convertire l'energia del moto ondoso in una forma utile, quello del tipo a colonna d'acqua oscillante (*Oscillating Water Column, OWC*) è uno degli pochi ad aver raggiunto il livello di sviluppo di prototipo realizzato in scala 1:1 (Boake et al. 2002; Neumann et al. 2006, Torre-Erciso et al. 2009; Arena et al. 2015). Per massimizzare l'efficienza del dispositivo e così promuoverne l'utilizzo, uno dei fattori cruciali è l'ottimizzazione per i moti ondosi caratteristici di un dato sito. In questo contesto, sono necessari strumenti di modellistica affidabili e precisi, in grado di simulare accuratamente la dinamica del sistema OWC e di prevedere la potenza da esso ottenibile. Le prove su modelli fisici a scala ridotta, pur essendo indispensabili per comprendere la dinamica del sistema e per la calibrazione e validazione di modelli numerici, comportano oneri elevati (sia economici sia temporali). La modellistica numerica è quindi uno strumento necessario qualora si si debbano testare in maniera comparativa le performance di un numero elevato di alternative progettuali. La teoria lineare del moto ondoso è generalmente applicata, nella prima fase di sviluppo, per studiare l'interazione tra dispositivi OWC e onde incidenti, tramite modelli semplificati quali quello a pistone rigido (Evans, 1978; Falcao et al., 2012) e quello della distribuzione uniforme di pressione (Brendano et al., 1996). Nel caso in cui la geometria del dispositivo sia complessa, per il calcolo dei coefficienti idrodinamici dell'OWC (massa aggiunta e smorzamento radiativo) si impiegano generalmente metodi agli elementi finiti o metodi degli elementi al contorno (Brito-Melo et al., 2001; Vosset & Clément, 2003), lineari e non lineari. Al fine di ottenere un'appropriate caratterizzazione degli effetti viscosi, delle interazioni multi-scala e della turbolenza, sono necessarie tecniche di fluidodinamica computazionale (*Computational Fluid Dynamics, CFD*). Il presente lavoro tratta l'ottimizzazione sito specifica della geometria di un dispositivo OWC per l'installazione in climi ondos moderati, come quello mediterraneo. Lo studio è condotto tramite modellistica CFD, validata con dati di laboratorio raccolti mediante test sperimentali su un modello a scala ridotta.

2 GEOMETRIA DEL DISPOSITIVO OWC E CLIMA ONDOSO DI RIFERIMENTO

Il dispositivo OWC considerato è caratterizzato da una camera a sezione rettangolare, equipaggiata da un'apertura circolare sulla parete superiore, al fine di introdurre una perdita di pressione caratterizzata da una relazione quadratica tra flussi d'aria e pressioni, tipica di turbine ad azione. Il dispositivo realizzato in scala ridotta è stato oggetto di una precedente campagna di test su modello fisico condotta presso il Laboratorio di Ingegneria Marittima dell'Università degli Studi di Firenze (LABIMA, www.labima.unifi.it), documentato in Crema et al., 2015. Il sito considerato per l'ipotetica installazione è una area marina della costa Toscana, a sud di Livorno. La selezione del sito di riferimento, basata sui vincoli tecnici e non tecnici e sulla caratterizzazione del potenziale dell'energia da moto ondoso, sono stati effettuati in precedenti lavori (Cannucchi & Cappiati, 2013). Nel sito di riferimento il valore medio della potenza del moto ondoso è di circa 4 kW/m. In questo contesto, l'onda di progetto scelta per sviluppare la geometria ottimale dell'OWC ha un'altezza H di 2 m e un periodo T di 7 s perché risulta essere quella che contribuisce maggiormente all'apporto energetico medio annuo.

3 MODELLISTICA CFD

Lo studio è condotto utilizzando l'ambiente open-source di fluidodinamica computazionale OpenFOAM®, ed in particolare il solutore *interFoam*, che implementa la metodologia *Volume Of Fluid* (VOF) per fluidi bi-fase. La discretizzazione spaziale adottata è a volumi finiti.

3.1 Equazioni di del modello

Considerando un fluido newtoniano, omogeneo ed incompressibile, le equazioni di governo sono quelle per la conservazione della massa e della quantità di moto:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\Gamma} + \rho \mathbf{f}_b \quad (2)$$

dove u, ρ e p sono, rispettivamente, il campo di velocità, la densità e la pressione del fluido, $\boldsymbol{\Gamma}$ è la parte deviatorica del tensore degli sforzi di superficie, f_b le forze di volume per unità di massa. Il sistema multifase è trattato con l'approccio VOF, quindi l'intero flusso bifase è risolto attraverso un unico sistema di equazioni, nel quale le proprietà di ciascuna fase variano nello spazio in base alla rispettiva frazione di volume γ :

$$\phi = \gamma \phi_1 (1 - \gamma) \phi_2 \quad (3)$$

dove γ assume valori compresi fra 0 e 1 (con valore esattamente 0 o 1 nelle zone contenenti soltanto una delle fasi) e ϕ indica genericamente una della proprietà del fluido ($\rho, u, \text{etc.}$) e i pedici 1 e 2 denotano rispettivamente la fase liquida e gassosa.

3.2 Canale marittimo virtuale

Il dispositivo OWC è simulato all'interno di un canale marittimo virtuale (*numerical wave tank, NWT*), nel quale la generazione e l'assorbimento dell'onda incidente sono realizzati utilizzando il toolbox *waves2Foam* (Jacobsen, 2012). Il solutore idrodinamico *interFoam* è unito ad un approccio basato su *relaxation zone* utilizzato sia per introdurre le onde nel dominio di calcolo che per annullarne la componente riflessa dal fondo del canale. All'interno delle *relaxation zone*, i valori di velocità e livello della superficie libera sono ottenuti come media pesata tra le condizioni al contorno e la soluzione calcolata dal codice.

Il NWT è tridimensionale e ha le dimensioni del canale fisico disponibile presso il LABIMA, tuttavia per limitare l'onere computazionale, lo sviluppo longitudinale è stato limitato a circa 5 lunghezze d'onda (λ) lungo la direzione di propagazione. La griglia di calcolo è più fitta intorno alla zona della superficie libera, garantendo una risoluzione di circa 78 celle per lunghezza d'onda e 6 celle per altezza d'onda. Tali valori sono stati fissati a seguito di test di sensibilità sulla dimensione della griglia condotti in precedenza (Simonetti et al., 2015). La griglia di calcolo ha maggiore risoluzione anche in prossimità della struttura dell'OWC e intorno al condotto presente sulla parete superiore (Fig. 1-c). Il modello di turbolenza adottato è del tipo *Lage Eddy Simulation* (LES).

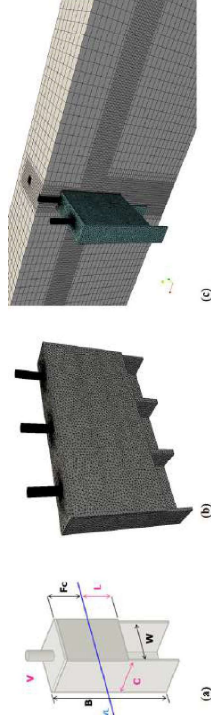


Figura 1. Geometria e parametri caratteristici del dispositivo (a), discretizzazione della geometria del dispositivo (b), dettaglio della griglia di calcolo in prossimità del dispositivo (c).

4 RISULTATI

4.1 Validazione del modello

Il modello numerico è stato validato riproducendo le stesse geometrie e i moti ondosi regolari testati in laboratorio, per un set complessivo di 16 configurazioni. Il livello d'acqua interno alla camera (η_{OWC}), la pressione interna (p) e la componente verticale della velocità dell'aria attraverso il condotto sulla parete superiore (u_x) sono confrontati con le misure sperimentali (Fig. 2). Il valor medio del coefficiente di correlazione R è di 0,98 circa, per tutti i parametri considerati.

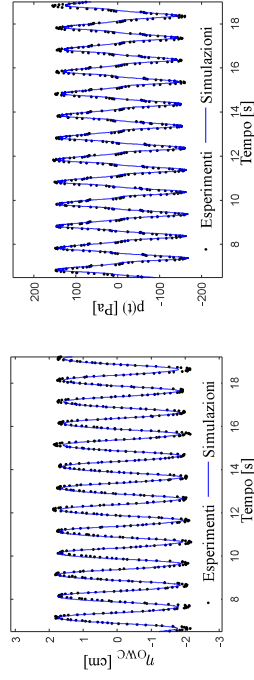


Figura 2. Confronto fra serie temporali di livelli d'acqua (sinistra) e pressioni (destra) all'interno della camera OWC, simulati e misurati.

4.2 Efficienza pneumatica del dispositivo OWC

Il modello numerico, una volta validato, viene utilizzato per aumentare il numero di configurazioni geometriche testate rispetto a quelle studiate tramite la modellistica fisica. In particolare, sono state testate variazioni dei parametri geometrici (profondità della camera, C , sommergenza della parete frontale, L , damping applicato dalla turbina) nell'intorno di quelli relativi alla configurazione più efficiente tra quelle testate sperimentalmente (caratterizzata da $C=10m$ e $L=3.5m$). In questo modo, è stato possibile identificare con maggiore precisione la geometria ottimale. L'efficienza di conversione pneumatica del dispositivo OWC, ε , è calcolata come:

$$\varepsilon = \frac{P_{owc}}{P_{wave} \cdot W} \tag{4}$$

dove W denota la larghezza della singola camera OWC in direzione trasversale a quella di propagazione dell'onda, P_{owc} indica la potenza pneumatica in uscita dal dispositivo OWC, e P_{wave} indica il la potenza dell'onda incidente per unità di metro, espressi rispettivamente come:

$$P_{owc} = \frac{1}{T_{ext}} \int_0^{T_{est}} q(t) p(t) dt \tag{5}$$

$$P_{wave} = \frac{1}{16} \rho g H^2 \omega \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \tag{6}$$

dove T_{est} denota la durata della prova, $q(t)$ e $p(t)$ il flusso d'aria attraverso il condotto di uscita e la pressione nella camera OWC, ρ è la densità dell'acqua, H e ω indicano rispettivamente l'altezza e la frequenza angolare dell'onda incidente, k è il numero d'onda e h la profondità dell'acqua. Per quanto riguarda l'onda di progetto nel sito di installazione di riferimento ($H=2m$, $T=7s$), il massimo valore di ε raggiunto è pari a circa l'80% per la geometria ottimale quando il coefficiente di damping, K (coefficiente di proporzionalità nella relazione quadratica tra pressione e portata), assume specifici valori (Figura 3).

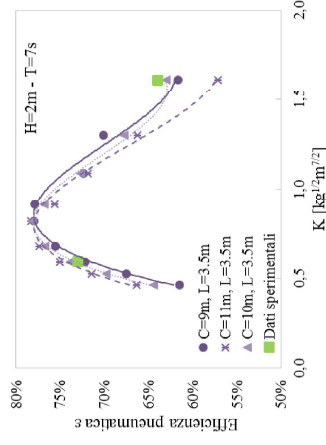


Figura 3. Efficienza pneumatica del dispositivo OWC in funzione del coefficiente di damping, K .

5 CONCLUSIONI

L'utilizzo di simulazioni CFD in ambiente OpenFOAM®, ha consentito la realizzazione di un canale marittimo virtuale validato mediante i dati sperimentali di un corrispondente canale fisico. Con il canale virtuale è stato ampliato lo studio parametrico volto alla ottimizzazione della tecnologia OWC, rispetto alle configurazioni studiate su modello fisico. L'approccio metodologico ha permesso di determinare con elevata precisione i valori dei parametri caratteristici della geometria del dispositivo e il coefficiente di damping che massimizzano l'efficienza di conversione energetica. Valori di efficienza piuttosto elevati sono ottenuti in corrispondenza di limitati vari di sommergenza della parte frontale del dispositivo (3.5 m). A tale proposito, è opportuno sottolineare che il dispositivo in esame è concepito per installazione offshore e che la parete posteriore arriva a profondità pari a circa un terzo della lunghezza d'onda di riferimento, al fine di massimizzare la riflessione e quindi aumentare le prestazioni del dispositivo.

REFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Arena, F., Malara, G., Romolo, A. A U-OWC wave energy converter in the Mediterranean Sea: Preliminary results on the monitoring system of the first prototype, Proc. 1st International Conference on Renewable Energies Offshore, Lisbon, Portugal, 2015.

Boake, C.B., Whittaker, T.J.T., Folley M., Ellen, H. Overview and Initial Operational Experience of the LIMPET Wave Energy Plant, 12th Int. Offshore Polar Eng. Conf. 2002.

Brendano, A., Falnes, J. & Lillebekken, P.M. Linear modelling of oscillating water columns including viscous loss. Applied Ocean Research, 18, pp. 65-75, 1996

Brito-Melo, A., Hoffmann, T., Sarmento, A.J.N.A., Clément, H. & Delhommeau, G. Numerical modelling of OWC-shoreline devices including the effect of surrounding coastline and non-flat bottom. Int. J. offshore Polar Eng. 11, pp. 147-154, 2001.

Crema, L., Simonetti, L., Cappiotti, L., & Oumeraci, H. Laboratory Experiments on Oscillating Water Column wave energy converters integrated in a Very Large Floating Structure, Proc. of 11th European Wave & Tidal Energy Conference, Nantes, France, 2015.

Evans, D.V. The Oscillating water Column Wave Energy Device. J. Fluid Mechanics, 22, pp. 423-433, 1978.

Falcao, A.F. de O., Henriques, J.C.C. & Candido, J.J. Dynamics and optimization of the OWC spar buoy wave energy converter. Renewable energy 48, pp. 369-381, 2012.

Jacobson N.G., Fritman D.R. & Fredsoe J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: Open-Foam. Int. J. Numer. Methods Fluids 70: 1073-88, 2012.

Josset, C. & Clement, A.H. A time-domain numerical simulator for oscillating water column wave power plants. Renewable Energy 32, pp. 1379-1402, 2007.

Neumann, F., Brito-Melo, A., Sarmento, A.J.N.A., "Grid connected OWC wave power plant at the Azores, Portugal", Proceedings Int. Conf. Ocean Energy: from innovation to industry, OTTI, ISBN 2-934681-49-2, pp. 53-60, 2006.

Simonetti, L., Cappiotti, L., El Saffi, H. & Oumeraci, H. 3D Numerical Modelling of Oscillating Water Column Wave Energy Conversion Devices: Current Knowledge and OpenFOAM® implementation, Proc. 1st International Conference on Renewable Energies Offshore, Lisbon, Portugal, 2015.

Torre-Enciso, X., Orubia, I., De Aguilera, L.I.L. & Marqués, J. Murriku Wave Power Plant: from the thinking out to the reality. 8th Eur. Wave Tidal Energy Conf., Uppsala, Sweden, 2009.

Vannucchi, V. & Cappiotti L. Wave Energy Estimation In Four Italian Nearshore Areas. Proceedings of the 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, June 9-14, Nantes, France, 2013.