



# QUANTIFICAZIONE DELLE PERDITE DI ENERGIA UTILE IN DISPOSITIVI WEC-OWC

Irene Simonetti<sup>1\*</sup> & Lorenzo Cappiotti<sup>1</sup>

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

\*email: [irene.simonetti@unifi.dicea.unifi.it](mailto:irene.simonetti@unifi.dicea.unifi.it)

## ASPETTI CHIAVE:

- Il lavoro presenta lo studio delle perdite energetiche nel processo di conversione dell'energia del moto ondoso di un dispositivo a colonna d'acqua oscillante (OWC)
- Lo strumento utilizzato è un canale marittimo virtuale basato sulla CFD e validato con dati sperimentali, tramite il quale si analizza in dettaglio il bilancio energetico dell'OWC
- Fra le geometrie di OWC testate in questo studio, le perdite di energia potenzialmente recuperabile raggiungono un valore pari al 10% dell'energia dell'onda incidente.

## 1 INTRODUZIONE

L'energia del moto ondoso è una fonte rinnovabile oggetto di crescente attenzione, a livello internazionale e più recentemente anche italiano. Il principio per la conversione dell'energia del moto ondoso del tipo “a colonna d'acqua oscillante” (*Oscillating Water Column*, OWC) consiste, schematizzando fino ad un livello di base, in una struttura cava, aperta al di sotto del livello del mare, all'interno della quale una camera d'aria viene pressurizzata e depressurizzata dall'azione dell'onda incidente, producendo un flusso d'aria che aziona una turbina. Una revisione esaustiva dello stato dell'arte dei sistemi OWC è fornita da *Falcão & Henriques* (2016). Sebbene, a livello concettuale, la tecnologia OWC sia una delle più consolidate (con diverse installazioni prototipali a scala reale in Europa sin dalla fine del secolo scorso, si veda ad esempio *Falcão*, 1999; *Boake et al.*, 2012; *Torre-Enciso et al.*, 2009; *Arena et al.*, 2013), un'ottimizzazione della geometria del dispositivo che miri a massimizzarne l'efficienza di conversione è fondamentale per consolidarne lo sviluppo verso la commercializzazione.

Il tema dell'ottimizzazione sito specifica della geometria di un dispositivo OWC per l'installazione in climi ondos moderati, come quello caratteristico del Mar Mediterraneo, è stato affrontato in *Simonetti et al.*, 2017, mostrando come, tramite l'adozione di parametri di progetto opportunamente calibrati, sia possibile ottenere un'efficienza di conversione pneumatica massima dell'87% per un dispositivo fisso e distaccato dal fondo e posto in acque relativamente profonde. Con l'obiettivo di un'ottimizzazione globale del dispositivo, è anche fondamentale una conoscenza di dettaglio dell'effetto individuale dei parametri di progetto sui diversi termini della catena di conversione energetica dell'OWC, poiché le perdite di energia per irreversibilità possono avere un effetto rilevante sulle prestazioni del dispositivo stesso. Per tale scopo, è utile disporre di modelli numerici in grado di riprodurre la dinamica del fenomeno fisico con adeguata risoluzione spaziale e temporale, includendo gli effetti non-lineari e viscosi (come i modelli basati su fluidodinamica computazionale, *Computational Fluid Dynamics*, CFD).

Questo lavoro investiga la tematica specifica delle perdite energetiche all'interno di un OWC. Il dispositivo è simulato in un canale marittimo virtuale (*Numerical Wave Tank*, NWT), realizzato con tecniche CFD. Il modello, una volta validato con dati sperimentali, è utilizzato per analizzare il bilancio energetico per differenti valori ei parametri geometrici dell'OWC, quantificando le predite energetiche corrispondenti a ciascuna geometria e fornendo contestualmente una panoramica dei fenomeni fisici coinvolti nelle perdite energetiche per questo tipo di dispositivo.

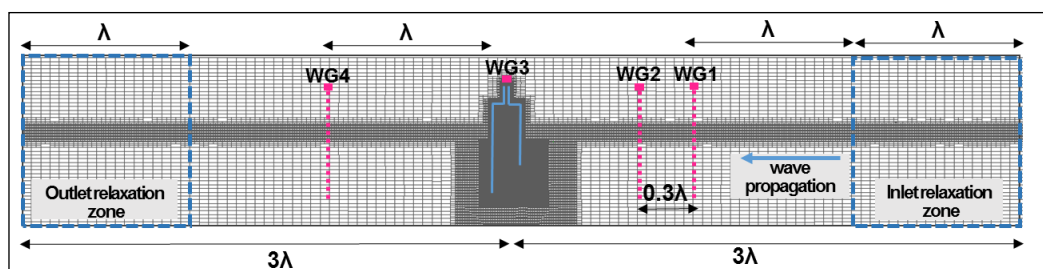
## 2 MATERIALI E METODI

Lo studio è basato su modellistica numerica del dispositivo OWC, condotta utilizzando l'ambiente open-source di fluidodinamica computazionale OpenFOAM®, che implementa la metodologia *Volume Of Fluid*

(VOF) per sistemi fluidi bi-fase: 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 in volume. La discretizzazione spaziale è ai volumi finiti.

## 2.1 Il modello di dispositivo OWC

Il dispositivo OWC considerato è fisso, distaccato dal fondo, ed è costituito da tre camere identiche, adiacenti, a sezione rettangolare, che occupano l'intera larghezza del NWT. Ciascuna camera OWC è equipaggiata ciascuna da un'apertura circolare sulla parete superiore, per indurre una perdita di pressione caratterizzata da relazione tra portate e pressioni di tipo quadratico (tipica di turbine ad azione). Una simile geometria di OWC, a scala ridotta, è stata oggetto di una precedente campagna di test su modello fisico, condotta presso il Laboratorio di Ingegneria Marittima dell'Università degli Studi di Firenze (LABIMA), precedentemente documentata in *Crema et al., 2015* e *Simonetti et al., 2017*.



**Figura 1.** Dominio di calcolo del canale marittimo virtuale e posizione del dispositivo OWC e delle sonde di livello (WG).

Il dispositivo è simulato in un canale virtuale NWT, nel quale la generazione e l'assorbimento dell'onda incidente sono realizzati utilizzando il toolbox *waves2Foam* (Jacobsen, 2012), combinato con il solutore idrodinamico *interFoam*. Il NWT è tridimensionale e ha le dimensioni del canale fisico disponibile presso il LABIMA, con sviluppo longitudinale limitato a circa 6 lunghezze d'onda ( $\lambda$ ) nella direzione di propagazione dell'onda (Fig. 1), per ridurre l'onere computazionale. La griglia di calcolo è più fitta intorno alla superficie libera e intorno alla struttura del dispositivo OWC, adottando la risoluzione necessaria a garantire l'indipendenza dei risultati dalle caratteristiche della griglia stessa, come documentato in *Simonetti et al., 2017*. Il modello di turbolenza adottato è del tipo *Large Eddy Simulation* (LES). La griglia di calcolo risultante ha un numero di celle di circa 3.500.000.

La variazione della superficie libera nel NWT è monitorata tramite sonde di livello numeriche (WG1-WG4, Fig. 1). Due sonde sono situate di fronte al dispositivo (WG1 e WG2), per separare la componente dell'onda riflessa dal dispositivo da quella incidente con il metodo di *Goda & Suzuki, 1976*. Una sonda è localizzata in corrispondenza del centro del dispositivo (WG3), per monitorare il livello d'acqua interno,  $\eta_{owc}$ . Una sonda è collocata dopo l'OWC, per calcolare l'onda trasmessa oltre il dispositivo (WG4).

Il modello numerico sviluppato è stato validato con riferimento ai dati sperimentali disponibili, mostrando uno scarto quadratico medio normalizzato (NRMSE) inferiore al 16% per tutte le variabili confrontate (i.e., pressione intera alla camera,  $p_{owc}$ , livelli d'acqua nella camera  $\eta_{owc}$  e velocità dell'aria nel condotto di uscita dell'OWC,  $u_y$ ).

## 2.2 Il bilancio energetico per il dispositivo OWC

In questo lavoro è stata adottata l'equazione di bilancio energetico per un dispositivo OWC proposta da *Elhananfi et al., 2016* e *Mendes & Monteiro, 2007*:

$$E_i = E_r + E_t + E_s + E_e + E_l \quad (1)$$

dove: (i)  $E_i$  è l'energia dell'onda incidente; (ii)  $E_r$  è l'energia dell'onda riflessa dal dispositivo OWC; (iii)  $E_t$  è l'energia trasmessa al di sotto dell'OWC; (iv)  $E_s$  è l'energia potenziale immagazzinata nel movimento oscillatorio della colonna d'acqua interna all'OWC; (v)  $E_e$  è l'energia pneumatica estraibile dal dispositivo; (vi)  $E_l$  la frazione di energia complessivamente persa nel processo di trasformazione.

Per un'onda incidente con periodo  $T$  e altezza  $H$  che si propaga su un fondale a profondità costante  $h$ , l'energia dell'onda incidente per unità di larghezza del fronte d'onda,  $E_i$ , è calcolata come

$$E_i = \frac{1}{8} \rho g H^2 \lambda \quad [\text{J/m}] \quad (2)$$

dove  $\rho$  è la densità dell'acqua,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $\lambda$  la lunghezza d'onda.

$E_r$  e  $E_t$  possono essere stimate (tra gli altri metodi) una volta che siano note le altezze d'onda riflesse e trasmesse ( $H_r$  e  $H_t$ ): il quadrato del coefficiente di riflessione ( $K_r^2$ ) corrisponde, infatti, a  $E_r/E_i$ , mentre il quadrato del coefficiente di trasmissione ( $K_t^2$ ) corrisponde a  $E_t/E_i$ . L'energia estratta dall'OWC in un periodo d'onda (per unità di larghezza della camera in direzione trasversale a quella di propagazione dell'onda,  $B$ ) vale

$$E_e = \frac{1}{B} \int_0^T p_{owc} \cdot q_{owc} dt \quad [\text{J/m}] \quad (3)$$

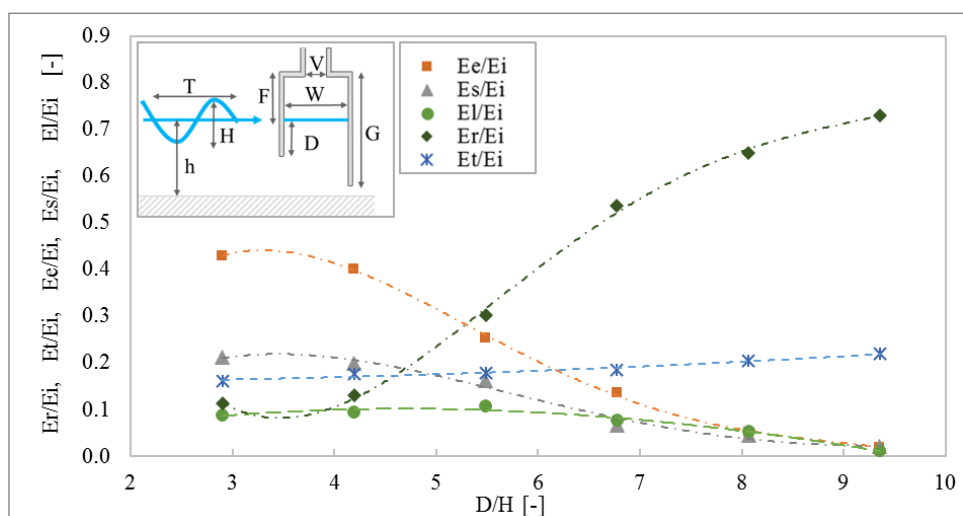
Come proposto da *Elhananfi et al. (2016)* e *Mendes & Monteiro (2007)*, data l'ampiezza di oscillazione della superficie libera all'interno della camera  $H_{owc}$  e indicata con  $W$  la profondità della camera OWC nella direzione di propagazione dell'onda incidente, l'energia immagazzinata  $E_s$  può essere espressa come

$$E_s = \frac{\rho g H_{owc}^2 W}{16} \quad [\text{J/m}] \quad (4)$$

Una volta quantificati i termini introdotti, la perdita di energia  $E_l$  avente luogo nell'interazione fra l'onda e il dispositivo OWC può essere stimata applicando il bilancio in Equazione 1.

### 3 RISULTATI

In base ai risultati del modello CFD, il bilancio energetico è stato applicato a geometrie con valori costanti dei seguenti parametri: (i) freeboard,  $F=15\text{cm}$ ; (ii) profondità della camera in direzione di propagazione dell'onda  $W=0.15\text{cm}$ ; (iii) larghezza della camera in direzione trasversale a quella dell'onda,  $B=20\text{cm}$ ; (iv) lunghezza della parete posteriore  $G=44\text{cm}$ ; (v) diametro del foro sul simula la turbina  $V=3.5\text{cm}$ . Si sono, invece, considerati valori della sommergezza della parete frontale  $D$  variabili fra  $9\text{cm}$  e  $29\text{cm}$ . È stata considerata un'onda incidente con  $H=3\text{cm}$  e  $T=1\text{s}$ , con una profondità d'acqua  $h=50\text{cm}$ .



**Figura 2.** Componenti del bilancio energetico per il dispositivo OWC in funzione della sommergezza della parete frontale relativa  $D/H$ . I risultati si riferiscono ad un'onda incidente con periodo  $T=1\text{s}$ , altezza  $H=3\text{cm}$ , profondità d'acqua  $h=50\text{cm}$ .

Al diminuire della sommergenza  $D$ , sia l'energia immagazzinata ( $E_s$ ) sia quella persa ( $E_l$ ) mostrano un andamento crescente (Figura 2). Il massimo valore di  $E_s/E_i$  è circa 0.2 e ha luogo in corrispondenza di un valore relativo di oscillazione del livello d'acqua nella camera  $H_{owc}/H=2$ . Il rapporto fra l'energia persa e quella incidente  $E_l/E_i$  varia da un minimo di 0.01 (per  $D/H=9.4$ ) a un massimo di circa 0.1 (per  $D/H=2.9$ ). L'aumento di  $E_l$  al decrescere di  $D$  può essere fisicamente interpretato considerando la distribuzione verticale della velocità indotta dall'onda incidente: per bassi  $D$  (pescaggio della parete frontale relativamente vicino alla superficie libera), le velocità indotte dall'onda possono essere tanto elevate da indurre separazione di flusso e formazione di strutture vorticosi coerenti all'interno delle quali è catturata e successivamente dissipata parte dell'energia incidente. L'entità di  $E_l/E_i$  stimata in questo lavoro è paragonabile a quella ottenuta da Elhanafi et al. 2016 (variabile fra 0.05 e 0.2 per valori di  $D/H \approx 2$ ).

#### 4 CONCLUSIONI

In questo lavoro, è stato utilizzato un canale marittimo virtuale tridimensionale per simulare un dispositivo OWC ed analizzarne il bilancio energetico, al fine di quantificare le perdite di energia imputabili a effetti dissipativi. Limitatamente alle configurazioni analizzate, è stata individuata un'incidenza massima delle perdite di energia  $E_l/E_i$  pari a circa 0.1. Adottare strategie progettuali specificamente mirate a ridurre gli effetti dissipativi (e.g., opportune caratteristiche dei bordi in prossimità della porzione terminale del muro frontale dell'OWC) potrebbe quindi apportare un beneficio rilevante alle prestazioni complessive, in termini di efficienza di conversione. Le geometrie di OWC preliminarmente analizzate in questo studio sono caratterizzate da valori sub-ottimali dei parametri di progetto. Tra le geometrie qui analizzate, infatti, il valore massimo del rapporto fra l'energia pneumatica estratta dall'OWC e l'energia incidente  $E_c/E_i$  (che costituisce l'indice generalmente utilizzato per definire l'efficienza di questo tipo di dispositivo) è pari a circa 0.43. Tale valore è quindi sensibilmente inferiore al massimo ottenibile con un simile OWC adottando parametri ottimizzati (pari a circa 0.87, come mostrato precedentemente in Simonetti et al., 2017). Future estensioni dello studio qui presentato riguarderanno l'estensione delle geometrie analizzate anche al caso di geometrie ottimizzate.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Arena, F., Romolo, A., Malara, G., Ascanelli, A. On Design and Building of a U-OWC Wave Energy Converter in the Mediterranean Sea: A Case Study. Proceeding of 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Nantes, France, 2013.
- Boake, C.B., Whittaker, T.J.T., Folley M., Ellen, H. Overview and Initial Operational Experience of the LIMPET Wave Energy Plant. Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu, Japan, 2002.
- Crema, I., Simonetti, I., 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.
- Elhanafi, A., Fleming, A., Macfarlane, G., Leong, Z. Numerical energy balance analysis for an onshore oscillating water column-wave energy converter, Energy, 2016, 116, 539–557.
- Elhanafi, A., Fleming, A., Macfarlane, G., Leong, Z. Numerical hydrodynamic analysis of an offshore stationary floating oscillating water column wave energy converter using CFD, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2017, 9, 77-99.
- Falcão, A.F. de O., Design and construction of the OWC wave power plant at the Azores. Wave power moving towards commercial viability- IMECHE Seminar, London, UK; 1999.
- Falcão, A.F. de O., Henriques, J.C.C. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review”, Renewable Energy, 2016, 85, 391–1424
- Goda, Y., Suzuki Y. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments, Proceedings of the 15th Int. Conf. Coastal Engineering, Hawaii, 1976.
- Jacobsen N.G., Fuhrman D.R. & Fredsøe J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: Open-Foam. Int. J. Numer. Methods Fluids 70: 1073-88, 2012.
- Mendes, A., Monteiro, W. Performance analysis of a model of OWC energy converter in non-linear waves, Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC), September 11-13, Porto, Portugal, 2007.
- Simonetti, I., Cappiotti, L., Elsafti, H., Oumeraci, H. Optimization of the geometry and the turbine induced damping for fixed detached and asymmetric OWC devices: A numerical study, Energy, 2017, 139, 1197-1209.
- Torre-Enciso, Y., Ortubia, I., Aguilera, L.I.L., Marqués, J. Mutriku Wave Power Plant: from the thinking out to the reality. Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden, 2009.