

G3-Giornate **Giovani** **GNRAC**

Quartiere Fieristico di Ferrara, 20 Settembre 2013

**MODELLISTICA ANALITICA E NUMERICA DI
DISPOSITIVI DI TIPO “OSCILLATING WATER COLUMN”
- Stato dell'arte e prime applicazioni**

Contenuto della presentazione

- Introduzione e Motivazioni
- Interazione OWC-onda: teoria potenziale
- Approcci alla modellazione dell'OWC
- Tecniche numeriche per la teoria potenziale
- Modellazione CFD
- Applicazione di modelli semianalitici
- Conclusioni
- Sviluppi futuri

Introduzione e motivazioni

Caratterizzazione della
disponibilità energetica nel
Mar Mediterraneo
(PhD V. Vannucchi)



Prototipazione &
Fattibilità/Ottimizzazione
(I. Crema)



Modello Numerico
(I. Simonetti)

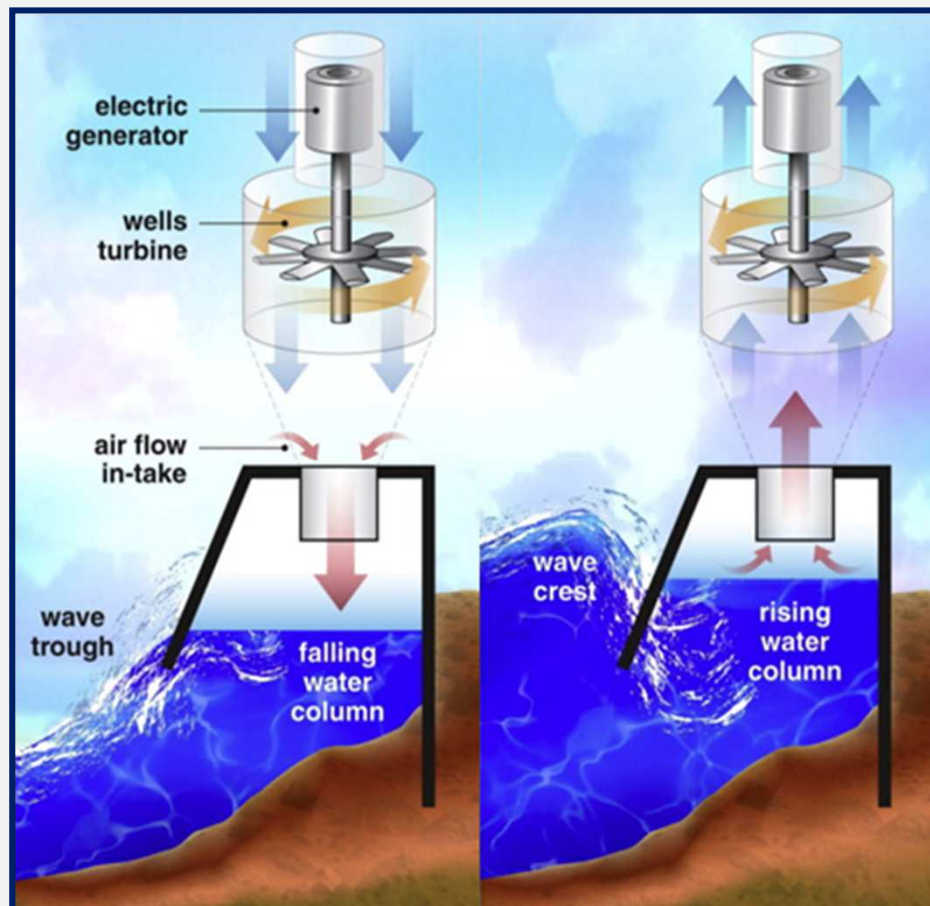
Caratterizzazione delle zone più
energetiche offshore e nearshore

Dimensionamento ed ottimizzazione
preliminare dell'efficienza idraulica e
della risposta idroelastica di un
sistema VLFS-OWC

Ottimizzazione dell'efficienza
idraulica e meccanica

Introduzione e motivazioni

□ Principio di funzionamento Oscillating Water Column (OWC):



(Li et al., 2012)

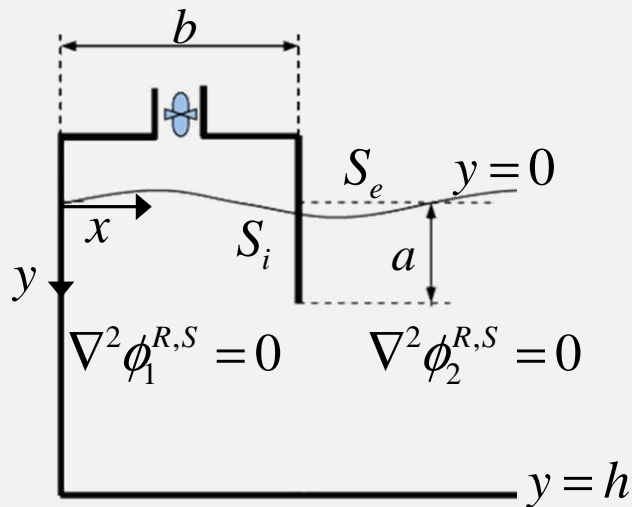
Energia meccanica onde → oscillazione
colonna d'acqua → compressione e
decompressione aria nella camera →
turbina ad aria

- Concetto semplice: limitato numero di componenti mobili
- Ha raggiunto il livello di prototipo a scala reale
- L'ottimizzazione dell'efficienza idraulico-meccanica è fondamentale per la diffusione su ampia scala

Interazione OWC-onda: teoria potenziale

Teoria lineare del moto ondoso \longrightarrow Il flusso può essere espresso in termini di potenziale di velocità

$$\Phi(x, y, t)$$



- Problema della **Riflessione** Φ^R
- Problema dello **Scattering** Φ^S

$$\Phi = \Phi^R + \Phi^S$$

- L'equazione di Laplace è soddisfatta

S_i : superficie libera nell'OWC

S_e : superficie libera esterna

L_b : area del muro frontale

$H(x,t)$: quota superficie libera

$P_d(t)$: pressione nella camera

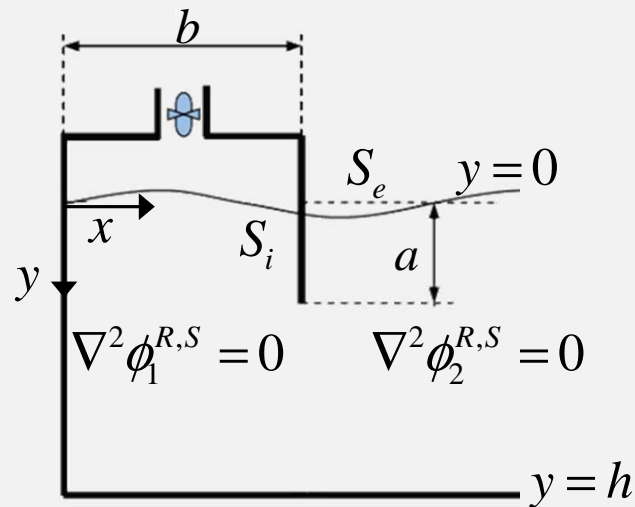
$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \text{ nel fluido}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \text{ sul contorno solido}$$

Interazione OWC-onda: teoria potenziale

Teoria lineare del moto ondoso \longrightarrow Il flusso può essere espresso in termini di potenziale di velocità

$$\Phi(x, y, t)$$



□ Condizione di superficie libera:

$$gH - \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \begin{cases} P_d(t)/\rho, & (x,y) \in S_i \\ 0, & (x,y) \in S_e \end{cases}$$

□ Condizioni al contorno

$$\begin{aligned} \nabla^2 \phi = 0 \text{ nel fluido} & \quad \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \text{ per } x=0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \text{ per } y=h & \quad \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \text{ per } (x,y) \in L_b \end{aligned}$$

S_i : superficie libera nell'OWC

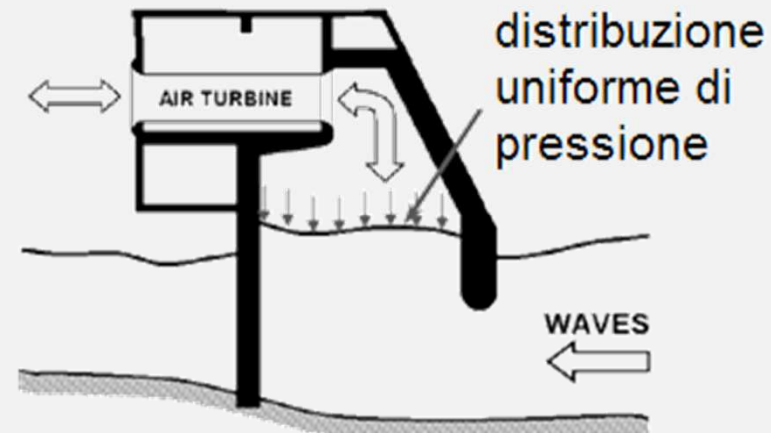
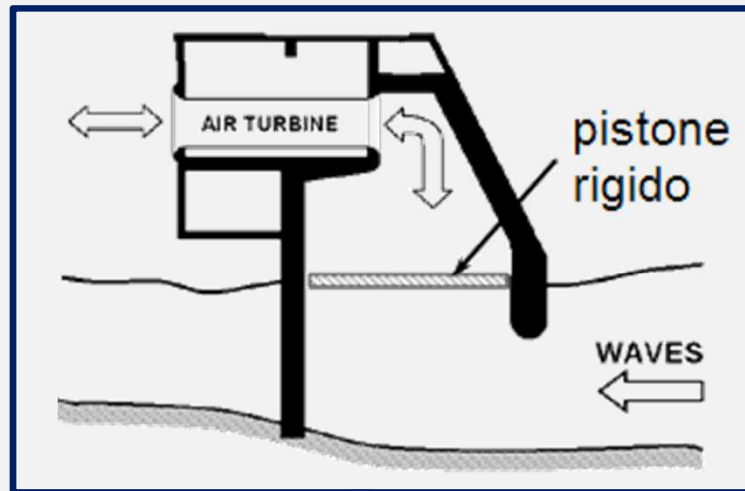
S_e : superficie libera esterna

L_b : area del muro frontale

$H(x,t)$: quota superficie libera

$P_d(t)$: pressione nella camera

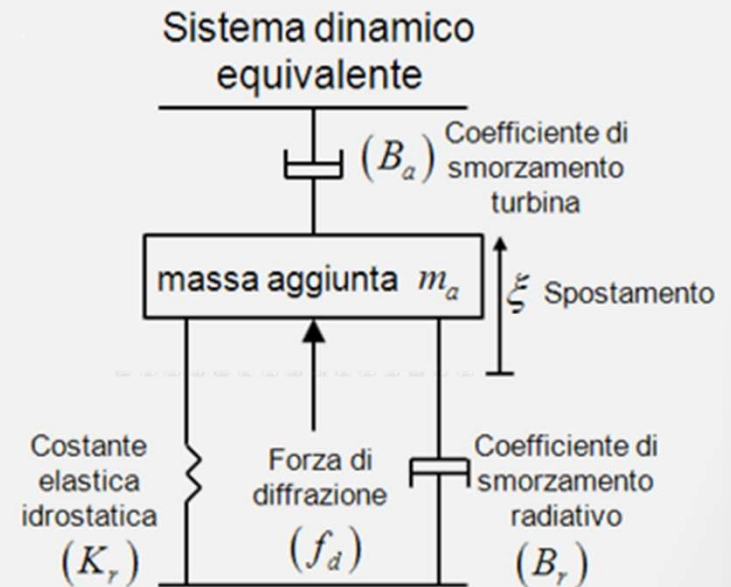
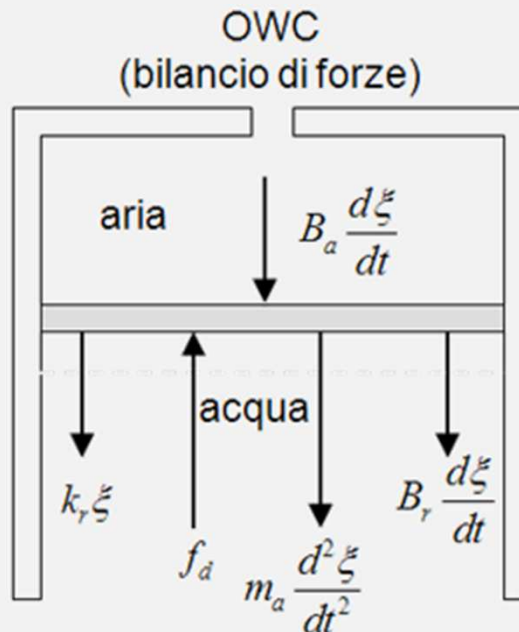
Approcci alla modellazione dell'OWC



- ❑ La superficie interna dell'OWC è schematizzata come un piatto rigido (Evans, 1978; Ma, 1995; Karami et al., 2012; Falcão et al., 2012)
 - ❑ Ignora le deformazioni della superficie libera
 - ❑ Conduce ad una distribuzione non uniforme di pressione
 - ❑ Per sistemi con rapporto lunghezza d'onda-dimensione camera OWC elevato

Approcci alla modellazione dell'OWC

Modello del
pistone rigido



□ Bilancio delle forze sul piatto rigido → Equazione del moto

$$\frac{md^2\xi}{dt^2} + B_a \frac{d\xi}{dt} + K_r \xi = f_d(t) + f_r(t)$$

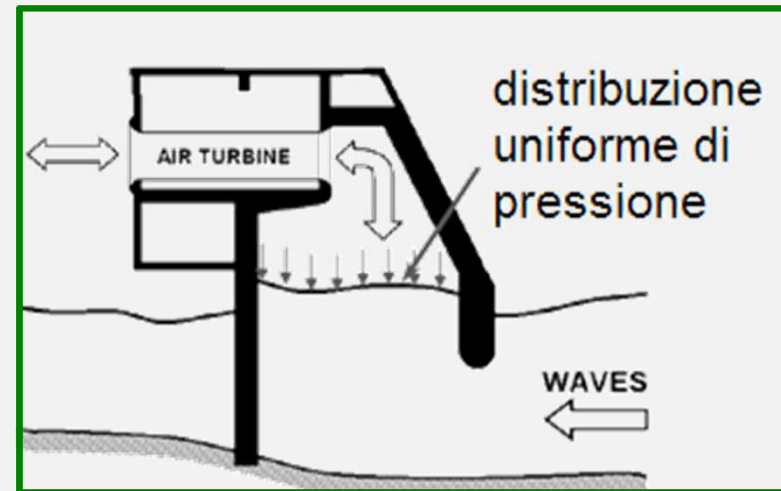
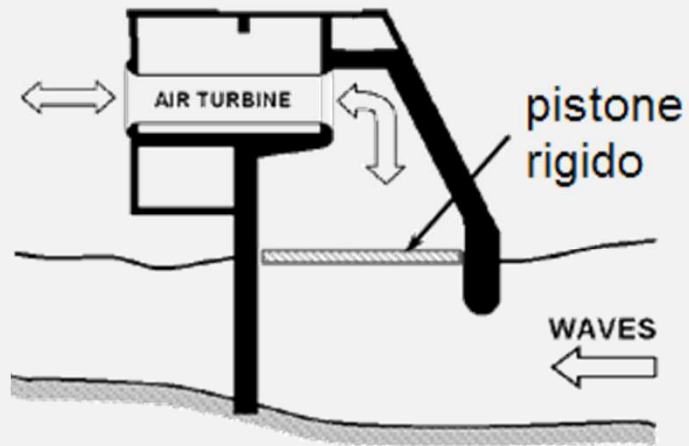
$$f_r(t) = - \left(m_a \frac{d^2\xi}{dt^2} + B_r \frac{d\xi}{dt} \right)$$



$$m_a = \rho \iint_S \text{Re}[\Phi^R] n_z \cdot ds$$

$$B_r = i\rho\omega \iint_S \text{Im}[\Phi^R] n_z \cdot ds$$

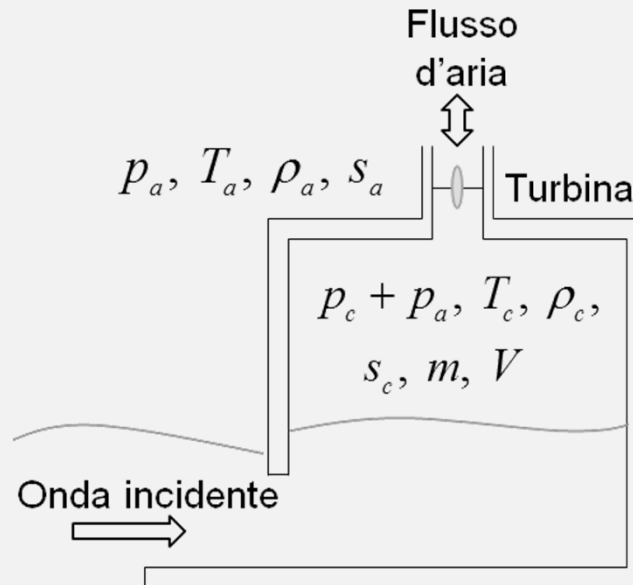
Approcci alla modellazione dell'OWC



- ❑ Considera deformazioni della superficie interna dell'OWC
(Falcão et al., 1980; Evans, 1982)
- ❑ Non limitato dal rapporto lunghezza d'onda-dimensione camera
- ❑ E' applicabile a più alte frequenze e minori lunghezze d'onda

Approcci alla modellazione dell'OWC

Modello
distribuzione
uniforme di
pressione



Massa d'aria nella
camera: $m = \rho_c V$

Flusso in massa
attraverso la turbina:
 $-dm/dt = w_t$

Portata d'aria: $q(t) = -dV/dt = q_e(t) + q_r(t)$

contributo forza eccitante

contributo radiativo

$$\frac{w_t}{\rho_c} = -\frac{V}{\rho_c} \frac{d\rho_c}{dt} - \frac{dV}{dt} = -\frac{V}{\rho_c} \frac{d\rho_c}{dt} + q_e + q_r$$

Approcci alla modellazione dell'OWC

Modello
distribuzione
uniforme di
pressione

- Ipotizzando un processo di compressione e decompressione isoentropico nella camera:

$$q_e(t) + q_r(t) = \frac{w_t(t)}{\rho_a} \left(1 + \frac{p_c(t)}{p_a} \right)^{1/\gamma} + \frac{V(t)}{\gamma(p_c(t) + p_a)} \frac{dp_c}{dt}$$

- Hp: turbina lineare $\Psi = K\Phi$

- Linearizzando nel dominio della frequenza:

$$Q_e + Q_r = \left(\frac{KD}{\rho_a \Omega} + \frac{i\omega V_0}{\gamma p_a} \right) P_c.$$

$$Q_r = -(G + iB)P_c$$

Ω =velocità di rotazione turbina

G=conduttanza radiativa

B=suscettanza radiativa

Approcci alla modellazione dell'OWC

| | Coefficienti idrodinamici | Metodo risolutivo |
|---|---------------------------|--|
| Modello del pistone rigido | m_a B_r | <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Soluzione analitica del problema al contorno del potenziale di velocità (<i>Evans, 1982; Sarmento & Falcão, 1985</i>) <input type="checkbox"/> Soluzione numerica - codici commerciali (WAMIT) basati sul metodo degli elementi al contorno (BEM) <input type="checkbox"/> Risultati da test su modelli in scala in laboratorio |
| Modello distribuzione uniforme di pressione | G B | |

Tecniche numeriche per la teoria potenziale

□ Metodi numerici più diffusi per la soluzione del problema al contorno dell'interazione OWC-moto ondoso:

- Espansione in autofunzioni
- Espansione combinata in autofunzioni
- Metodo degli elementi al contorno (Boundary Element Method, BEM)

□ Espansione in autofunzioni

(Suzuky et al., 2005; Martins-Rivas & Mei, 2009; Mondal et al, 2011)

Espansione del potenziale di velocità in una serie infinita di autofunzioni mediante separazione delle variabili

Applicabile a geometrie limitate

□ Espansione combinata in autofunzioni

(Evans & Porter, 1997; Senturk, 2012)

Definizione di autofunzioni diverse su diverse porzioni del dominio

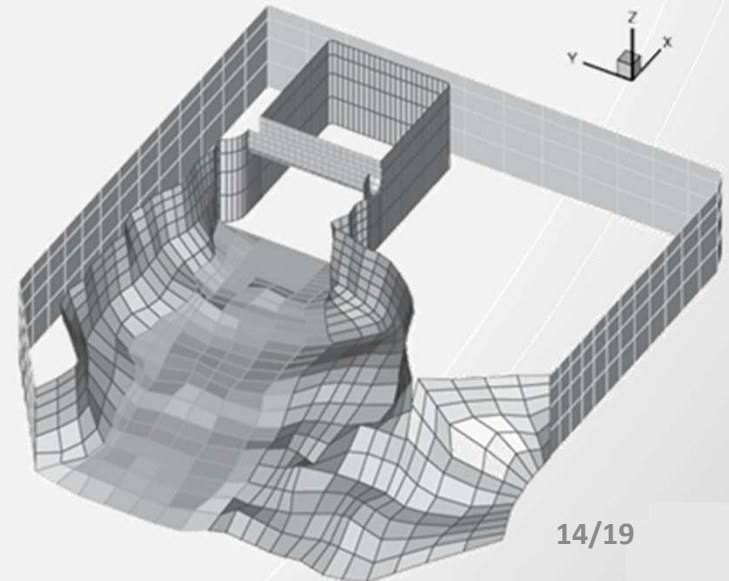
Tecniche numeriche per la teoria potenziale

□ Metodo degli elementi al contorno (BEM)

(*Lee et al., 1996; Brito-Melo et al., 2001; Delauré & Lewis, 2003; Gomes et al., 2012*)

- Metodo più diffuso per la soluzione dell'interazione OWC-onde
- Trasforma il problema al contorno in un problema integrale tramite funzioni di Green
- Codici commerciali applicabili: WAMIT, AQWA e AQUADYN

- Difficoltà specifiche nel modellare domini che presentano concavità → discontinuità fra sorgenti interne ed esterne → errori numerici



Modellazione CFD

- Effetti viscosi (turbolenza, separazione dello strato limite) rilevanti per la predizione delle forze idrodinamiche → utilizzo delle equazioni di Navier-Stokes
 - necessario un codice di calcolo CFD (Computational Fluid Dynamics) come **FLUENT** o **OpenFOAM**
- OWC: sistema bifase (aria-acqua) → necessario un metodo di tracciamento della superficie libera → generalmente VOF (Volume of Fluid)
- Metodo consolidato per le componenti meccaniche (turbina) limitate applicazioni all'efficienza idraulica

Marjani et al., 2008;

Conde & Gato, 2008;

Senturk & Ozdman, 2011

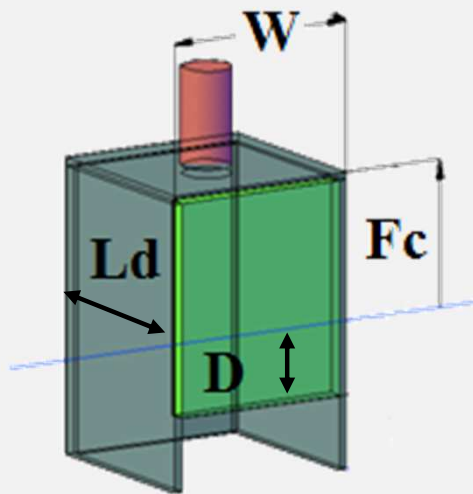
Zullah & Lee, 2011

FLUENT, VOF, modello di turbolenza $k-\varepsilon$

ANSYS CFX, modello di turbolenza $k-\varepsilon$

Applicazione di modelli semianalitici

- Individuazione dei parametri fondamentali per l'efficienza idraulico-meccanica di un OWC
- Indagine preliminare del range di variazione dei parametri per successive ottimizzazioni (modellistica fisica o numerica avanzata)
- Individuazione del range di misura degli strumenti per modellistica fisica

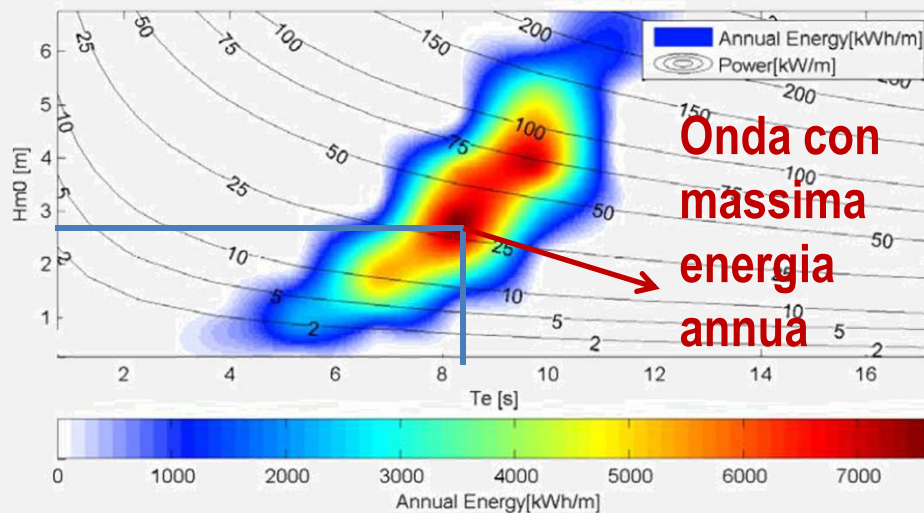


- Applicazione al design preliminare di un modello fisico¹ di OWC integrato in VLFS (*Very Large Floating Structure*)
- Definizione di parametri di progetto sito-specifici (Sardegna, UTM32 4532021 mE, 429802 mN, profondità fondale: 50m)

¹ collaborazione con I. Crema, Università di Firenze

Applicazione di modelli semianalitici

□ Valutazione del range del parametro sommergenza D da indagare fisicamente



➤ Massima energia annua associata all'onda:

$$H_{m0}=3m; T_e=8.5s$$

(Vannucchi, V., 2013, Tesi PhD)

➤ Per la risonanza del dispositivo con quest'onda:

Modello del
pistone rigido

$$\frac{md^2\xi}{dt^2} + B_a \frac{d\xi}{dt} + K_r \xi = f_d(t) + f_r(t) \Rightarrow \omega_n = \sqrt{\frac{K_r}{(m + m_a)}}$$

Valore di D necessario per la risonanza con l'onda più energetica: **D=18m**

Conclusioni

- ❑ Modellistica numerica per OWC particolarmente utile in congiunzione con fasi di modellistica fisica (predimensionamento con modelli semplificati, validazione e calibrazione con dati sperimentali di modelli avanzati)
- ❑ Aspetti specifici limitano l'applicabilità di BEM per OWC:
 - Fenomeni vorticosi e flussi turbolenti in prossimità della parete frontale
 - Inadeguatezza di BEM per domini con concavità
- ❑ Possibilità di utilizzare risultati di modellistica fisica per stimare i coefficienti idrodinamici (implementazione di sistemi di controllo)
- ❑ Simulazione avanzata di fenomeni rilevanti (aspirazione di acqua in turbina) → simulazioni CFD

Sviluppi futuri

- Implementazione di un modello numerico CFD per OWC isolati e installati in VLFS (*Very Large Floating Structure*) in ambiente OpenFOAM
- Validazione e calibrazione del modello numerico con dati sperimentali (tesi di dottorato I. Crema, Università degli Studi di Firenze)
- Ottimizzazione parametrica per via numerica dell'efficienza di conversione energetica idraulica e meccanica (simulazione numerica della turbina)

G3-Giornate **G**iovani **G**NRAC

Quartiere Fieristico di Ferrara, 20 Settembre 2013

Grazie per l'attenzione

Riferimenti bibliografici

- Brito-Melo, A., Hoffman, T., Sarmiento, A.J.N.A., Clément, H., Delhommeau, G., 2001, Numerical modelling of OWC-shoreline devices including the effect of surrounding coastline and non-flat bottom, International Journal of Offshore and Polar Engineering, 11.
- Conde, J., M., Gato, L., M., C., 2008, Numerical study of the air-flow in an oscillating water column wave energy converter, Renewable Energy, 33, pp: 2637– 2644
- Delauré, Y.M.C., Lewis, A., 2003, 3D hydrodynamic modelling of a fixed oscillating water column wave power plant by a boundary element methods, Ocean Engineering, 30, pp: 309-330.
- Evans, D.V., 1978, The Oscillating water Column Wave Energy Device, Journal of Fluid Mechanics, 22, 423-433
- Evans, D. V., Porter, R., 1997, Efficient Calculation of Hydrodynamic Properties of OWC-Type Devices. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 119, pp: 210-218
- Evans, D.V., 1982, Wave-power absorption by a system of oscillating surface pressure distribution. Journal of Fluid Mechanics
- Falcao, A.F. de O., Henriques, J.C.C., Candido, J.J., 2012, Dynamics and optimization of the OWC spar buoy wave energy converter, Renewable energy, 48, pp: 369-381
- Falcão, A.F. de O., Sarmiento, A.J., 1980, Wave generation by a periodic surface pressure and its application in wave-energy extraction. 15th Int. Cong. Theor. Appl. Mech. Toronto
- Gomes, R.P.F., Henriques, J.C.C., Gato, L.M.C., Falcao, A.F.O., 2012, Hydrodynamic optimization of an axisymmetric floating oscillating water column for wave energy conversion, Renewable Energy, 44, pp: 328-339
- Karami, V., Ketabdari, M., J., Akhtari, A., K., 2012, Numerical modelling of the oscillating water column wave energy convertor, International Journal of Advanced Renewable Energy research, 1, pp: 196-206

- Lee, C.H., Newman, J.N., F., Nielsen, F.G., 1996, Wave interaction with an Oscillating Water Column, In: Proc. Int. Soc. Offshore and Polar Engineering, ISOPE, Vol. I, pp: 82-90.
- Li, Y., Yu, Y., 2012, A synthesis of numerical methods for modeling wave energy converter-point absorbers, Renewable and Sustainable Energy Review, 16, pp: 4352-4364
- Marjani, A.E., Ruiz, F.C., Rodriguez, M.A., Santos, M.T., 2008, Numerical modelling in wave Energy conversion systems, Energy, 33, pp: 1246-1253
- Martins-Rivas, H., Mei, C.C., 2009, Wave power extraction from an oscillating column at the tip of a breakwater, Journal of Fluid Mechanics, 626, pp: 395-414
- Mondal, R., Mohanty, S.K., Sahoo, T., 2011, Expansion formulae for wave structure interaction problems in three dimensions, IMA Journal of Applied Mathematics, pp: 1-25.
- Sarmiento, A., Falcao, AF de O., 1985, Wave generation by an oscillating surface-pressure distribution and its application on wave Energy extraction, Journal of Fluid Mechanics, 150, pp: 467-485
- Senturk, U., Ozdamar, A., 2012, Wave energy extraction by an oscillating water column with a gap on the fully submerged front wall, Applied Ocean Research, 37, pp: 174-182
- Senturk, U., Ozdman, A., 2011, Modelling the interaction between water waves and the oscillating water column wave energy converter, Mathematical and Computational Applications, 16, pp: 630-640
- Suzuki, M., Washio, Y., Kuboki, T., 2005, Characteristics of Floating Type Wave Power Generating System with Oscillating Water Column, Proceedings of the 15th International Offshore and Polar Eng Conf, Seoul, ISOPE, pp: 529-536
- Zullah, M., A., Lee, Y., H., 2013, Performance evaluation of a direct drive wave energy converter using CFD, Renewable Energy, 49, pp: 237-241.