



# IDRA16



**ATTI DEL CONVEGNO**  
A CURA DEL COMITATO  
EDITORIALE IDRA16

XXXV

CONVEGNO  
NAZIONALE  
DI IDRAULICA  
E COSTRUZIONI  
IDRAULICHE

Bologna

Chiesa di Santa Cristina  
14 Settembre 2016

Scuola di Ingegneria e Architettura  
Alma Mater Studiorum  
Università di Bologna  
15-16 Settembre 2016

AMBIENTE, RISORSE,  
ENERGIA: LE SFIDE  
DELL'INGEGNERIA  
DELLE ACQUE  
IN UN MONDO  
CHE CAMBIA

**Pubblicato da:**

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM)  
Scuola di Ingegneria e Architettura  
Università di Bologna - ALMA MATER STUDIORUM A.D. 1088  
<http://www.dicam.unibo.it>

**Comitato Editoriale IDRA16:**

Attilio Castellarin  
Renata Archetti  
Emanuele Baratti  
Matteo Cappelletti  
Francesca Carisi  
Alessio Domeneghetti  
Maria Gabriella Gaeta  
Agnese Paci  
Simone Persiano  
Alessio Pugliese  
Achilleas Samaras

**Copertina:** I&C srl

**L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X editor:** Alessio Pugliese (L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X's 'confproc' package, ver. 0.8, by V. Verfaillie)

Settembre 2016

**ISBN:** 9788898010400

**Versione elettronica disponibile:**

<http://amsacta.unibo.it/id/eprint/5400>

DOI: 10.6092/unibo/amsacta/5400

**AlmaDL**  
University of Bologna Digital Library

AlmaDL è la Biblioteca Digitale dell'Alma Mater Studiorum Università di Bologna. AlmaDL ospita al suo interno gli archivi Open Access che rendono pubblicamente disponibili i contributi derivanti dalle attività di ricerca, didattiche e culturali dell'Ateneo bolognese. AlmaDL attua così i principi del movimento internazionale a sostegno dell'accesso aperto alla letteratura scientifica, sottoscritti dall'Università di Bologna assieme a molte altre istituzioni accademiche, di ricerca e di cultura, italiane e straniere.

<http://almadl.unibo.it>

**Volume distribuito con Licenza:** 

Creative Commons 4.0 Internazionale

Attribuzione-Non commerciale-Condividi allo stesso modo

(CC-BY-NC-SA)

# INTERAZIONI TRA COMPONENTI ELETTRICHE E IDRODINAMICHE PER UN CONVERTITORE DI ENERGIA ONDOSA

Luca Martinelli<sup>1</sup>, Piero Ruol<sup>1</sup>, Chiara Favaretto<sup>1</sup>, Francesco Marini<sup>1</sup>

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale ICEA, Università degli Studi di Padova

## ASPETTI CHIAVE

- Viene caratterizzato sperimentalmente il convertitore di energia ondosa denominato ShoWED, adatto ad essere utilizzato nei mari italiani.
- Il modello esaminato è dotato del generatore, ed è stata misurata direttamente l'energia elettrica prodotta.
- Vengono descritti i risultati in termini di dinamica del galleggiante e di potenza prodotta dal generatore per diversi attacchi ondosi, in funzione dell'impedenza del circuito di utilizzazione.

## 1 INTRODUZIONE

Questa nota illustra brevemente i risultati di uno studio su un dispositivo di energia ondosa denominato ShoWED condotto nel canale ad onde del Dipartimento ICEA dell'Università di Padova. Lo ShoWED ha la caratteristica di convertire modeste quantità di energia, dell'ordine di 2 kWp (kW picco) in condizioni di prototipo, risultando quindi tecnologicamente molto diverso rispetto ai convertitori attualmente in via di sviluppo, che sono progettati per potenze di almeno 2 ordini di grandezza superiori. Lo ShoWED mira pertanto ad essere un dispositivo a basso costo, adatto per mari poco energetici, quali quelli Italiani, o per specchi d'acqua relativamente chiusi e protetti. Informazioni dettagliate sulla disponibilità di energia ondosa in Italia sono presenti ad esempio in Vicinanza et al. (2011) o in Liberti et al. (2013).

Il sistema esaminato è dotato di un galleggiante di materiale espanso, vincolato a oscillare verticalmente. Citando Salters (da Cruz, 2008) *many inventors start with heaving floats*. Di fatto è frequente osservare che le boe soggette all'azione delle onde assumono un moto oscillatorio, ed è intuitivo immaginare che tale moto possa essere convertito in energia da un opportuno generatore. Un esempio di un convertitore in un avanzato stadio di sviluppo, basato su questo principio, è il WaveStar ([www.wavestar.com](http://www.wavestar.com)).

Il brevetto dello ShoWED è relativo al sistema di generazione, classificabile fra quelli di tipo elettromagnetico, privo di meccanismi oleodinamici, che ci si attende essere molto efficiente per onde con altezza e periodi limitati, specificatamente altezze significative  $H_s$  da 0.3 a 2.0 m e periodi di picco  $T_p$  da 1.5 a 5.0 s. Martinelli et al. (2016) presentano una possibile applicazione di questo dispositivo in abbinamento a frangionde galleggianti.

## 2 PROVE DI LABORATORIO

Le prove sperimentali sono state effettuate nel canale ad onde del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA) dell'Università di Padova. Il canale ha lunghezza di 36.0 m, larghezza di 1.0 m e altezza di 1.3 m. L'indagine sperimentale si propone di stimare il rendimento del convertitore di energia ondosa ShoWED.

Il modello studiato, dotato di un generatore trifase attualmente in fase di sviluppo, è già ad una scala prossima a quella finale. Di fatto la scocca è la medesima del dispositivo Giant, installato per un certo periodo nella laguna di Venezia (lungo il Canale della Giudecca). Il galleggiante facente parte del modello è largo 1.0 m ed ha sezione ellissoidale, con asse orizzontale di 0.75 m e verticale di 0.45 m ed è stato posizionato con un tirante di 0.5 m. L'affondamento all'equilibrio è di circa 0.11 m. In una ideale configurazione a scala di prototipo, la lunghezza del galleggiante (e la potenza del generatore) è maggiore, ma la sezione trasversale è invariata.

Il modello è stato esaminato sotto l'azione di moto ondoso regolare (di altezza  $H =$  fra 5 e 20 cm, periodo fra 1.0 e 5.0 s) e irregolare ( $H_s=9$  e 12 cm,  $T_p=2s$ ) per diverse caratteristiche di impedenza del circuito utilizzatore. Sono state esaminate tre configurazioni, tese ad evidenziare l'interazione fra il dispositivo e le strutture circostanti: 1) senza strutture a tergo; 2) con parete riflettente posta a 0.80 m; 3) con parete riflettente posta a 1.20 m. La Figura 1 presenta le configurazioni esaminate.

La potenza disponibile  $P_{disp}$ , ossia il flusso di energia ondosa incidente, mediata nel periodo ondoso, è:

$$P_{disp} = \rho g H^2 / 8 C_g B \quad (1)$$

dove  $B = 1$  m è la larghezza del dispositivo,  $H$  l'altezza d'onda regolare incidente e  $c_g$  è la celerità di gruppo.

La potenza media prodotta è stata stimata attraverso la misura del voltaggio  $V$  in uscita dal dispositivo, che alimenta un circuito di impedenza nota. La formula per ricavare la potenza media prodotta  $P_{prod}$  è:

$$P_{prod} = \langle V^2 / R \rangle \quad (2)$$

dove  $R$  è la resistenza scelta e  $\langle \rangle$  è l'operatore di media. Il valore in Volt misurato è di fatto una parte del totale, ottenuto da un partitore (rapporto di riduzione = 1/200).



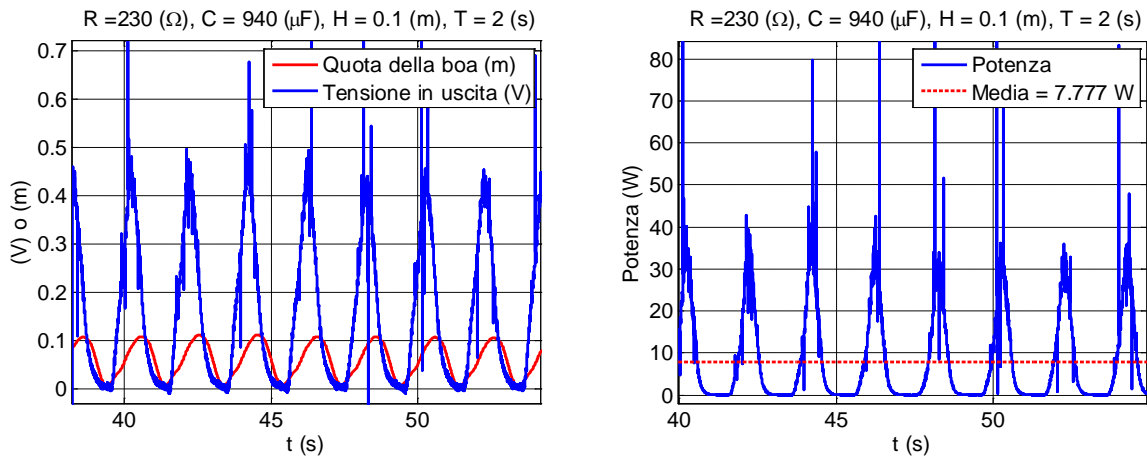
**Figura 1.** Il convertitore ShoWED in tre configurazioni: 1) senza parete riflettente a tergo; 2) con parete verticale posta a 80cm; 3) con parete verticale posta a 120 cm.

Il comportamento del dispositivo è fortemente influenzato dal periodo dell'onda incidente e dalla configurazione scelta. Per periodi corti ( $T < 1.0$  s), lo ShoWED non è in grado di convertire energia e le oscillazioni registrate risultano essere contenute. Il galleggiante è quasi lungo come l'onda, e quindi non subisce mediamente alcuna spinta verticale. Se l'onda è molto più lunga della boa, ne induce invece una oscillazione dell'ordine dell'altezza d'onda stessa. Infatti, per periodi lunghi, ( $T$  compreso nell'intervallo tra 3.0 s e 5.0 s), lo ShoWED converte buona parte dell'energia e le oscillazioni osservate sono sempre significative. Per il periodo  $T=2.0$  s, in configurazione 2 e 3, si ha un comportamento particolare. La boa si trova rispettivamente sul nodo e sull'antinodo dell'onda riflessa dalla parete retrostante. Nel primo caso, la boa non si muove, nel secondo subisce una oscillazione doppia rispetto al caso di assenza di riflessione.

La Figura 2, a sx, presenta l'oscillazione verticale del galleggiante ShoWED, nella configurazione 1, per un'onda incidente con  $H = 0.10$  m,  $T = 2.0$  s (flusso di energia = 28 W). Il galleggiante risulta oscillare verticalmente di 0.10 m, ossia si muove solidalmente al pelo libero. La tensione elettrica misurata cresce durante la fase di sollevamento della boa. Essa è funzione della potenza prodotta e del valore di resistenza  $R$  del circuito utilizzatore (cfr. Eq. 2). L'andamento temporale della tensione dipende però anche dall'interazione con il condensatore, che immagazzina energia nella fase iniziale, fintanto che la boa sale e finché esso non è completamente carico. Dopo mezzo periodo, nel cavo dell'onda, il galleggiante scende

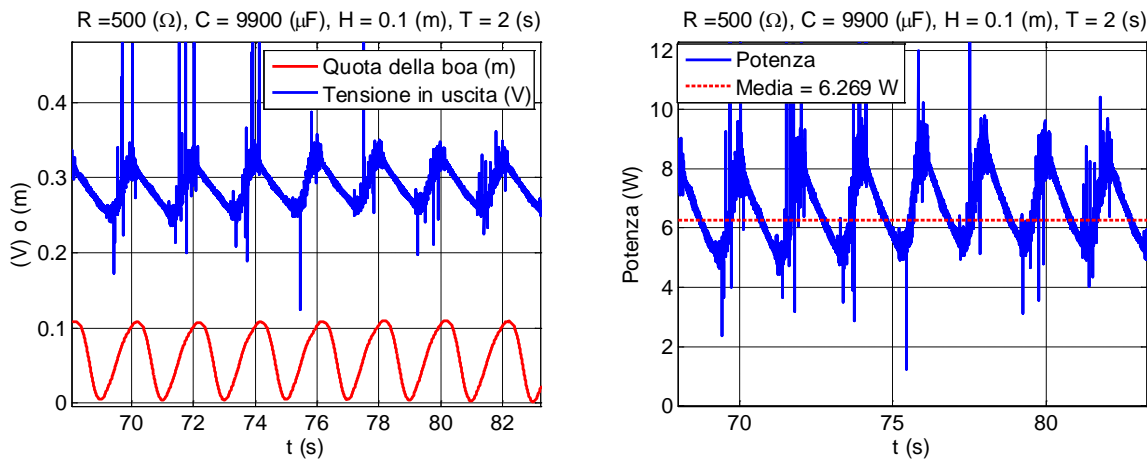
liberamente grazie al suo peso (senza essere frenato e senza generare energia) e in questa fase il condensatore rilascia l'energia elettrica precedentemente immagazzinata.

L'andamento temporale della tensione è presentato in Fig. 2, dx. Esso ha un comportamento oscillante, con picchi dell'ordine degli 80 W e con media pari a 7.78 W.



**Figura 2.** Esempio di registrazione della tensione in uscita e della potenza prodotta in funzione dell'oscillazione verticale del galleggiante (potenza media registrata 7.8 W).

La Figura 3 mostra l'oscillazione e la tensione per un valore di capacità pari a 9900 μF, diverso da quello mostrato in Fig. 2 (940 μF). Le oscillazioni del galleggiante hanno andamento leggermente diverso. La potenza prodotta è di gran lunga più stazionaria, anche se mediamente minore.



**Figura 3.** Esempio di registrazione della tensione in uscita e della potenza prodotta in funzione dell'oscillazione verticale del galleggiante (potenza media registrata di 6.3 W).

### Efficienza ShoWED

La miglior efficienza del dispositivo è stata riscontrata nella configurazione 3 per  $T = 2.0$  s, grazie, come detto, all'interazione con la parete retrostante. L'efficienza è misurata come rapporto tra la potenza media prodotta e il flusso di energia incidente medio. Tale flusso viene calcolato sia per onde regolari che irregolari, rispettivamente come:

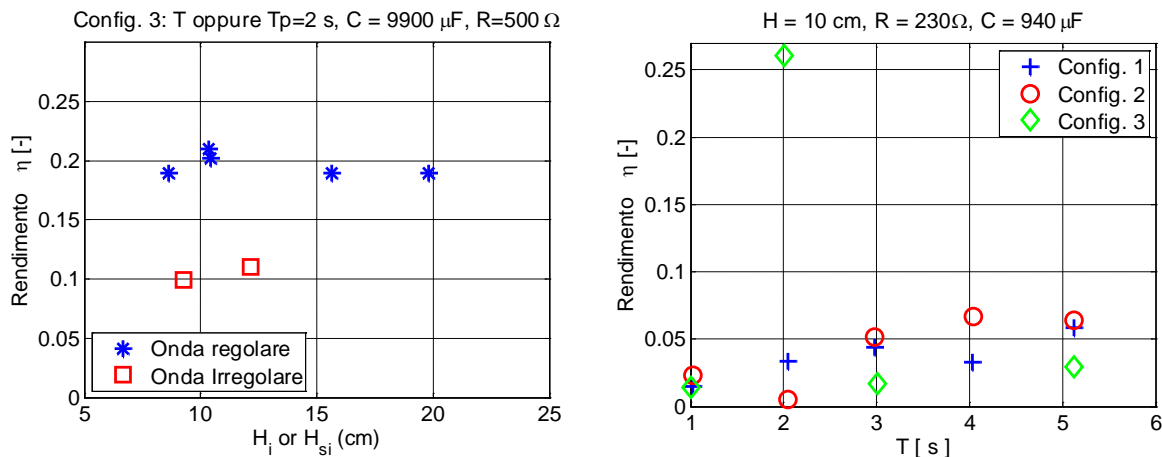
$$F = \langle \int p(z)u(z)Bdz \rangle = \rho g \frac{H^2}{8} c_g(T, h)B \approx \rho g \frac{H^2}{8} B\sqrt{gh} \quad (3)$$

$$F = \langle \iint p(f, z)u(f, z)Bdfdz \rangle = \langle \int S(f)c_g(f, h)Bdf \rangle = \rho g \frac{H_s^2}{16} c_g(f_e, h)B \approx \rho g \frac{H_s^2}{16} B\sqrt{gh} \quad (4)$$

dove  $H_s$  è l'altezza d'onda significativa. Il valore della celerità di gruppo  $c_g$ , per le prove eseguite, in acque

basse, vale  $\sqrt{gh}=2.2$  m/s, indipendentemente dal periodo.

La Figura 4 presenta il rendimento  $\eta$  con dispositivo in configurazione 3, soggetto ad onde di 2.0 s, ossia con boa posta all'antinodo della riflessione. Il rendimento è presentato in funzione dell'altezza d'onda, per onde regolari ed irregolari, ed è pari rispettivamente al 20% e 10%. Per onde di altezza minore di 4 cm, non è stata riscontrata produzione di energia.



**Figura 4.** Rendimento dello ShoWED per assegnate condizioni di capacità  $C$  e resistenza  $R$ : sx) al variare dell'altezza d'onda, per  $T=2.0$  s. dx) al variare del periodo dell'onda per le tre diverse configurazioni.

La Figura 4, a dx, presenta il rendimento in funzione del periodo dell'onda incidente per le tre configurazioni. L'efficienza è molto inferiore rispetto alla condizione di risonanza (Fig. 4, sx). Inoltre, il rendimento è inferiore ai massimi osservati, poiché l'impedenza imposta nel circuito utilizzatore che consente il confronto fra configurazioni non è quella ottimale. In generale, l'efficienza aumenta con il periodo ondoso, tranne che per i casi  $T=1.0$  s e  $T=2.0$  s, discussi in precedenza.

### 3 CONCLUSIONI

Sono stati eseguite alcune prove in laboratorio su un dispositivo di energia ondosa denominato ShoWED, in scala prossima a quella reale. La peculiarità delle prove è che il dispositivo è dotato del generatore elettrico, consentendo quindi la misura diretta dell'energia prodotta.

L'analisi iniziale ha portato a definire la configurazione resistenza/condensatore che garantisce il massimo rendimento (ossia  $R=230 \Omega$ ,  $C=940 \mu F$ ). Da rilevare il fatto che modificando l'impedenza del circuito utilizzatore cambia sensibilmente sia la dinamica del galleggiante, in termini di velocità di salita e ampiezza massima raggiunta, sia il rendimento.

In tali condizioni sono state esaminate alcune onde regolari e irregolari, con periodo tra 1 s e 5 s e altezza d'onda inferiore a 20 cm. È stato possibile misurare la conversione dell'energia ondosa in energia elettrica. Il rendimento è risultato variabile tra 5% e 20%. Il risultato è particolarmente incoraggiante dato che il dispositivo è dimensionato per onde di altezza significativamente maggiori di quelle prodotte in laboratorio.

### RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato parzialmente supportato dal progetto di Ateneo, programma n. CPDA149731, dal titolo "Research and development of new types of floating breakwaters in high-energy wave environments". Si ringrazia l'inventore, Manlio Boito, per aver consentito la pubblicazione dei risultati ottenuti.

### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Cruz, J. (2008): Ocean Wave Energy. Current Status and Future Perspectives. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 431 pp.
- Liberti L., Carillo A., Sannino G., (2013): Wave energy resource assessment in the Mediterranean, the Italian perspective, Renewable Energy, 50, 938-949.
- Martinelli L., Ruol P., Favaretto C. (2016). Hybrid structure combining a wave energy converter and a floating breakwater. ISOPE Conference, Rodi, in press, 7 pp.
- Vicinanza D., Cappiotti L., Ferrante V., Contestabile P. (2011): Estimation of the wave energy in the Italian offshore, J. of C. Res., 64.