

UN SISTEMA INNOVATIVO DI PRODUZIONE DI ENERGIA DA MOTO ONDOSO INTEGRATO IN DIGHE A GETTATA. ANALISI SPERIMENTALE DELLE PERFORMANCE IDRAULICHE

Relazione sintetica

Studente: *Fabrizio Puglisi*

Relatori: Prof.Ing. Rosaria E.Musumeci, Prof.Ing. Enrico Foti

Correlatori: Dott.Ing. Claudio Iuppa, Dott.Ing. Luca Cavallaro

Il presente lavoro di tesi nasce in seguito all'interesse maturato verso un tema trattato durante il corso di 'Idraulica dei sistemi naturali', tenuto dalla Prof.R.E.Musumeci nell'anno accademico 2014-2015, riguardante i "dispositivi di conversione di energia elettrica da moto ondoso".

Analizzando quindi i dati presenti in letteratura, si evidenzia come il consumo globale di energia nel 2040 sarà di circa il 30% in più rispetto a quello del 2010 e nel 2040, la produzione di elettricità sarà più del 40% del consumo globale di energia (Exxonmobil, 2012). Dato che le tradizionali fonti di energia sono limitate, questa richiesta non potrà essere soddisfatta nel prossimo futuro. In questo contesto, l'utilizzo di tecnologie e materiali innovativi capaci di sfruttare le energie rinnovabili svolgono un ruolo chiave.

Negli ultimi tre decenni, grandi sforzi sono stati fatti per lo sviluppo di tecnologie che sfruttano fonti rinnovabili quali, ad esempio, l'energia solare ed eolica. Tuttavia, vi è un'altra fonte energetica che sta cominciando ad imporsi e a suscitare grande interesse da parte della comunità scientifica, ovvero l'energia delle onde. I dispositivi utilizzati per la conversione di tale energia sono detti *wave energy converters* (WEC). Essi possono essere classificati sulla base della distanza dalla costa (*onshore, nearshore, offshore*), alla dimensione ed alla direzione di propagazione delle onde (*attenuator, point absorber, terminator*) ed in base al principio di funzionamento (*pressure differenzial, floating structure, overtopping device, impact device*). Ad oggi esistono più di 1500 brevetti depositati per i dispositivi WEC.

Tuttavia solo alcuni prototipi sono stati costruiti su larga scala e sono stati testati in condizioni reali di mare. L'unico sistema a livello commerciale è l'OWC realizzato a Mutriku (Spagna), avviato nel 2011 con una produzione stimata di 600 MWh.

In particolare, il presente lavoro di tesi, ha permesso di studiare e approfondire un innovativo sistema di conversione di energia dal moto ondoso ideato per essere integrato in dighe a scogliera, il cui acronimo è OBREC, *Overtopping Breakwater for Energy Conversion*. L'innovazione del sistema consiste nel disporre, rispetto una diga tradizionale, nella parte sommitale della scogliera un serbatoio per l'accumulo dei volumi d'acqua trascinati in seguito al processo di *overtopping*. La differenza di carico tra il livello nel serbatoio e il livello medio del mare determina la generazione di un flusso che può essere sfruttato per la produzione di energia elettrica mediante delle turbine idrauliche. Tale sistema oltre a permettere la protezione delle aree portuali, consente la produzione di energia elettrica. Inoltre, rispetto agli impianti *offshore*, tale sistema garantisce minori costi di manutenzione e di connessione alla rete elettrica.

Ad oggi, il sistema è ancora in fase di studio. In particolare, nel 2012 sono stati condotti i primi test su modello fisico presso il Laboratorio di Idraulica dell'Università di Aalborg, in Danimarca. Tale campagna sperimentale ha consentito di effettuare una prima valutazione sia delle prestazioni idrauliche sia delle prestazioni strutturali del dispositivo. In particolare, sono state definite delle formule di previsione per la stima: del coefficiente di riflessione, della portata trascinata a tergo della struttura, della portata trascinata nella vasca di accumulo e delle pressioni determinate dal moto ondoso (Vicinanza et al., 2014). L'esigenza

di ottimizzare la produzione di energia elettrica ha determinato la necessità di avviare una nuova campagna sperimentale per testare nuove configurazioni e ampliare il range di applicabilità delle formule di previsione

Gli aspetti fondamentali analizzati sono associati essenzialmente a due concetti:

- utilizzo di una nuova tecnologia per la produzione energetica;
- utilizzo di diversi materiali e configurazioni geometriche per la valutazione in termini di sicurezza.

In particolare ci si è posti l'obiettivo di stimare la portata tracimata, la quale è correlata con la valutazione della produzione energetica. Infatti, a maggiori valori di portata tracimata corrispondono maggiori valori di produzione e pertanto è necessario caratterizzare la probabilità di una data portata di tracimazione, la distribuzione dei volumi di tracimazione e la probabilità del numero di eventi di tracimazione.

Per ciò che riguarda la sicurezza invece, l'obiettivo ha riguardato la valutazione dell'impatto sulla navigazione e sull'operatività della struttura costiera, quantificando ed analizzando l'eventuale portata che tracima nella parte lato terra della struttura, scavalcando l'eventuale muro paraonde, e l'influenza della scabrezza della struttura sui fenomeni di riflessione delle onde. Inoltre, a maggiori valori di produzione energetica corrispondono anche maggiori volumi di portata tracimata a tergo della struttura.

L'obiettivo fondamentale di questo lavoro è stato quindi trovare il giusto compromesso tra produzione energetica e sicurezza idraulico-marittima del frangiflutti.

Le prestazioni idrauliche del dispositivo sono state studiate mediante modellazione fisica a scala di laboratorio.

L'analisi di laboratorio, rappresenta uno strumento indispensabile per la caratterizzazione dei fenomeni fisici specialmente per problematiche idrauliche ed in particolare in ambiente costiero, in cui si intende analizzare situazioni idrodinamicamente complesse.

Pertanto, è stato realizzato presso il Laboratorio di Idraulica del Dipartimento Ingegneria Civile e Architettura dell'Università di Catania un modello fisico a scala ridotta, di un dispositivo di conversione di energia da moto ondoso integrato in dighe a gettata, analizzandone soprattutto gli aspetti idraulici.

Si è scelto di considerare come forzanti del processo onde irregolari caratterizzate da un fissato spettro JONSWAP (Joint North Sea Wave Atmosphere Program). Tale scelta nasce dal fatto che le onde irregolari, essendo riconducibili a fenomeni naturali, consentono di avere una simulazione più realistica dello stato di mare.

La campagna sperimentale è stata concentrata prevalentemente nella caratterizzazione delle prestazioni idrauliche del sistema, analizzando nello specifico:

- la riflessione;
- la portata tracimata a tergo della struttura (*wave by wave*);
- la portata tracimata nella vasca di accumulo (*wave by wave*);
- la probabile distribuzione dei volumi tracimati nella vasca di accumulo.

Sono stati quindi realizzati due modelli fisici in scala pari a circa 1:30. Entrambi i modelli hanno consentito di valutare le prestazioni idrauliche del dispositivo. In particolare, uno di essi, denominato OBREC, è stato impiegato per studiare gli effetti di laminazione sulla portata determinati dalla vasca di accumulo; mentre l'altro denominato NW (No-Wall) è stato impiegato per studiare la distribuzione dei volumi *wave-by-wave*.

Per entrambi i modelli fisici, sono state testate due configurazioni geometriche, chiamate *small*, in cui si ha una scogliera in massi al di sotto della struttura con $D_{50}=4\text{cm}$, e *large*, in cui la scogliera è stata ricoperta interamente da una lastra in ferro impermeabile, per valutare l'influenza della scabrezza della scogliera sulle onde tracimate. Le prove, effettuate nei mesi di Maggio e Giugno 2015, sono state in tutto 118 e sono state condotte variando altezza d'onda, periodo di picco, livello idrico all'interno del canale e la configurazione geometrica dei modelli.

L'attività di post-analisi è stata suddivisa in due fasi: nella prima, è stato effettuato un confronto con le formule di previsione presenti in letteratura; nella seconda, sulla base dei risultati ottenuti si è cercato di

definire un possibile range dei parametri caratteristici del dispositivo affinché sia massimizzata l'energia prodotta e contemporaneamente siano rispettati degli opportuni livelli di sicurezza.

Per quanto concerne la prima fase, il confronto con le formule di letteratura ha consentito di effettuare delle osservazioni preliminari sulle prestazioni idrauliche. In particolare, è stato osservato che l'andamento del coefficiente di riflessione K_r nella configurazione *small* presenta valori maggiori rispetto gli andamenti di *Zanuttigh & Van der Meer* (2006) per roccia permeabile ed impermeabile. Ciò è giustificato in quanto le formule di *Zanuttigh & Van der Meer* (2006) sono state ricavate per scogliere complete, come quelle utilizzate nelle prove di laboratorio presso l'Università di Aalborg nel 2012. I modelli fisici realizzati presso il laboratorio di Idraulica del DICAR invece, sono stati realizzati simulando delle condizioni cautelative per la stima della riflessione, ipotizzando quindi che dietro la scogliera fosse realizzata una parete verticale in cassoni (poco permeabile), per permettere l'attracco delle navi. Da tenere in considerazione sono anche gli effetti di scala e la composizione del nucleo dei modelli, costituito in parte con mattoni forati che contribuiscono ad incrementare i valori di riflessione. Un'altra considerazione può essere fatta confrontando i valori di riflessione tra la struttura NW e la struttura OBREC. Si nota che, per entrambe le strutture, la variazione di K_r al variare di ξ_0 è la medesima. La struttura OBREC mostra tendenzialmente valori di K_r maggiori rispetto la struttura NW e ciò è dovuto alla presenza del parapetto verticale, in cui le onde tracimate impattano e vengono riflesse nuovamente. Il fenomeno si accentua nel momento in cui la vasca anteriore è satura. Analizzando i risultati nella configurazione *large* invece, si nota che i valori ottenuti dalle prove si allineano con i valori di *Zanuttigh & Van der Meer* (2006) per superficie liscia impermeabile. Anche in questa configurazione però la struttura OBREC mostra tendenzialmente valori di K_r maggiori rispetto la struttura NW, per le motivazioni anzidette.

Per ciò che riguarda invece la portata tracimata Q_{NW} , è stato osservato che la portata nelle due configurazioni (*small* e *large*) segue lo stesso andamento, ma i valori per la configurazione *large* per onde basse sono sempre maggiori della configurazione *small*. Ciò è giustificato dal fatto che, a causa della presenza della rampa impermeabile, onde basse, che nella configurazione *small* non riuscivano a tracimare, adesso tracimano, incrementando quindi i valori di portata. Tale scostamento non si apprezza per le onde più alte. Valutando inoltre le formule presenti in letteratura, si ha un buon adattamento per onde medio-basse con l'andamento di *Van der Meer* (1998) e *Kofoed* (2002), mentre per onde alte la formula di *Goda* (2009) sembra essere più idonea, probabilmente a causa del fatto che la sua formulazione tiene conto dell'influenza del fondo.

Analizzando la portata tracimata Q_{turb} , si è osservato come la portata nelle due configurazioni (*small* e *large*) segua lo stesso andamento. Osservando i valori per onde basse della configurazione *small* ci si accorge che essi sono nettamente inferiori rispetto quelli della configurazione *large*. Ciò è giustificato dal fatto che, a causa della presenza della rampa impermeabile, onde basse, che nella configurazione *small* non riuscivano a tracimare, adesso tracimano, incrementando quindi i valori di portata. Per onde più alte invece, tale differenza non si apprezza e l'andamento non segue più le formule di letteratura per valori di $R_r^* < 1.5$. Ciò è giustificato dal fatto che la vasca anteriore arriva a saturazione, raggiungendo il suo valore massimo.

Analizzando inoltre l'andamento della portata tracimata a tergo Q_T , si evidenzia come il sistema OBREC nella configurazione *large* tende a far aumentare leggermente la tracimazione a tergo rispetto la configurazione *small*, ed è un risultato che ci si aspettava. Confrontando i valori ottenuti con la formula di letteratura di *Vicinanza* (2014), ci si accorge chiaramente che i valori ottenuti sono ben più alti. Ciò è però giustificabile in quanto l'andamento di *Vicinanza*, è stato calcolato per struttura con parapetto verticale ed elemento orizzontale di protezione (*naso*), motivo per cui i valori corrispondenti alle condizioni per cui è stato ottenuto il modello sono al di sotto dei valori riscontrati nelle prove effettuate presso il laboratorio di Idraulica di Catania.

In seguito alla valutazione della probabilità di tracimazione delle onde P_{ow} , è stato osservato che, per entrambe le configurazioni, i valori osservati tendono a seguire l'andamento di Rayleigh, con una leggera

sottostima della configurazione *small* per onde più alte. Si apprezza invece una sovrastima per onde basse nella configurazione *large*, ciò dovuto al fatto che la rampa impermeabile, non avendo grossi effetti dissipativi, permette anche alle onde più basse di risalire la rampa (*uprush*) e quindi tracimare.

Analizzando infine la distribuzione probabilistica dei volumi tracimati, si denota come i valori nelle due configurazioni seguono l'andamento di *Victor* (2012), soprattutto per onde basse (R_r^* alto). Per onde più alte (R_r^* basso) i valori sembrano avere un andamento comunque esponenziale ma più ripido rispetto l'andamento di *Victor*. Confrontando inoltre i valori ottenuti tra le due configurazioni, si può notare come il fattore b non cambia, ovvero si hanno volumi maggiori nella configurazione *large* ma distribuiti allo stesso modo.

Nella seconda fase di post-elaborazione, analizzando i risultati in termini di *massimizzazione della produzione energetica*, possiamo affermare che, si ottengono valori di riflessione ($K_r=0.7-0.8$) e probabilità di tracimazione ($P_{ow}=0.6-0.7$) correlati ad una maggiore portata tracimata ($Q_{turb}>10^{-5}$ m³/s/m in scala di laboratorio e $Q_{turb}>10^{-3}$ m³/s/m in scala di prototipo) utilizzando la configurazione *large*. Ciò grazie al raggiungimento delle condizioni di saturazione, cioè al raggiungimento del livello massimo del serbatoio anteriore, a cui corrisponde il massimo carico (dislivello rispetto il livello medio mare) e quindi la massima portata erogabile in turbina. Il range di altezze d'onda H_{m0i} e periodi $T_{m-1,0}$ cui corrispondono queste condizioni sono rispettivamente 0.05-0.12 m e 0.7-1.3 s in scala di laboratorio e 1.5-3.6 m e 3.8-7.1 s in scala di prototipo.

Ragionando però in termini di *controllo della sicurezza*, la configurazione citata sopra fa sì che si abbiano valori di portata a tergo non trascurabili ($Q_T>10^{-4}$ m³/s/m per $H_{m0i}=0.05-0.12$ m $T_{m-1,0}=0.9-1.3$ s in scala di laboratorio e $Q_T>10^{-2}$ m³/s/m per $H_{m0i}=1.5-3.6$ m $T_{m-1,0}=4.9-7.1$ s in scala di prototipo) e se confrontati con i valori presenti in letteratura (*EurOtop Manual*, 2007) si evidenziano particolari criticità per pedoni e veicoli, che ipoteticamente transitano nella parte retrostante della diga, ed anche per la struttura stessa che può subire notevoli danni. Precedenti campagne sperimentali (*Vicinanza et al.*, 2014), mostrano però come la portata tracimata a tergo Q_T è riducibile, fino a valori prossimi all'80%, utilizzando un elemento orizzontale protettivo (*naso*) disposto nella parte sommitale del muro paraonde.

Viceversa, utilizzando la configurazione *small*, si ottengono mediamente bassi valori di portata tracimata a tergo ($Q_T<*10^{-6}$ m³/s/m per $H_{m0i}=0.03-0.09$ m $T_{m-1,0}=0.7-1.3$ in scala di laboratorio e $Q_T<*10^{-4}$ m³/s/m per $H_{m0i}=0.9-2.7$ m $T_{m-1,0}=3.8-7.1$ s in scala di prototipo), ma anche minori valori di produzione energetica a causa della ridotta portata tracimata che non sempre riesce a saturare la vasca anteriore d'accumulo. Il coefficiente di riflessione K_r si attesta su valori prossimi a 0.3-0.4. Naturalmente per onde con altezza $H_{m0i}> 0.10$ m ($H_{m0i}> 3$ m in scala di prototipo), probabilità di tracimazione e portate tracimate aumentano e tendono ad allinearsi con i valori della configurazione *large*.

Concludendo, il criterio di dimensionamento di un dispositivo di tipo OBREC deve mirare alla scelta di un sistema che garantisca la sicurezza e nel contempo la produzione energetica. La modellazione fisica condotta nell'ambito del presente lavoro di tesi ha contribuito a fornire utili indicazioni in tal senso.

Sulla base dei risultati ottenuti, uno sviluppo futuro del lavoro prevede la conduzione di altre prove di laboratorio per testare delle configurazioni intermedie con scogliera mista, costituita cioè per metà in massi e per metà in rampa impermeabile al fine di consentire un dimensionamento ottimale della struttura.