



Ricerca di Sistema elettrico

Monitoraggio e sviluppo di algoritmi per l'ottimizzazione dell'energia prodotta da un OWC in scala 1:1

Felice Arena, Vincenzo Fiamma, Valentina Laface, Giovanni Malara,
Alessandra Romolo, Federica Strati, Antonino Viviano

MONITORAGGIO E SVILUPPO DI ALGORITMI PER L'OTTIMIZZAZIONE DELL'ENERGIA PRODOTTA DA UN OWC IN SCALA 1:1

Felice Arena, Vincenzo Fiamma, Valentina Laface, Giovanni Malara, Alessandra Romolo, Federica Strati, Antonino Viviano (Università Mediterranea degli Studi di Reggio Calabria)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: GENERAZIONE DI ENERGIA ELETTRICA CON BASSE EMISSIONI DI CARBONIO

Progetto: B.1.5 ENERGIA ELETTRICA DAL MARE

Obiettivo: Monitoraggio e sviluppo di algoritmi per l'ottimizzazione dell'energia prodotta da un OWC in scala 1:1 (d)

Responsabile del Progetto: G. Sannino (ENEA)

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Monitoraggio e sviluppo di algoritmi per l'ottimizzazione dell'energia prodotta da un OWC in scala 1:1"

Responsabile scientifico ENEA: G. Sannino

Responsabile scientifico Università: F. Arena

Si ringrazia la società WAVENERGY.IT s.r.l., Spin Off dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria (www.wavenergy.it) per il supporto fornito nella redazione del rapporto, sul REWEC3 di Civitavecchia.

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 INQUADRAMENTO GENERALE DEL CLIMA ONDOSO	5
2.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E CLIMA AL LARGO	5
2.2 PROPAGAZIONE DEL CLIMA ONDOSO SOTTOCOSTA	7
2.3 PROPAGAZIONE DEL CLIMA ONDOSO SOTTOCOSTA	9
2.4 STIMA DELL'ENERGIA DISPONIBILE SOTTOCOSTA	12
3 MODELLAZIONE ANALITICA DEL DISPOSITIVO U-OWC.....	14
3.1 MODELLO BOCCOTTI	15
3.2 MODELLO MALARA-ARENA	17
3.3 STIMA DELLA POTENZA MECCANICA PRODOTTA DALL'IMPIANTO	18
3.4 EQUAZIONE TURBINA-GENERATORE	18
4 PROTOTIPO DI IMPIANTO U-OWC PRESSO IL PORTO DI CIVITAVECCHIA: DESCRIZIONE GENERALE DEL PROGETTO 19	
5 STRATEGIE DI CONTROLLO.....	23
5.1 LEGGE DI CONTROLLO SUL MOMENTO TORCENTE APPLICATO DAL GENERATORE.....	23
5.2 IDENTIFICAZIONE DELLA COSTANTE DELLA LEGGE DI PROPORZIONALITÀ K_p	24
5.3 GENERAZIONE DELL'INPUT	25
5.4 CALIBRAZIONE DEL VALORE OTTIMALE DI N_{REF} BASATA SULLO STATO DI MARE.....	26
5.5 CALIBRAZIONE DEL VALORE OTTIMALE DI N_{REF} BASATA SULLA DINAMICA ISTANTANEA DELLA CAMERA PNEUMATICA	30
5.6 EFFETTO DELLA STRATEGIA DI CONTROLLO SULLA DINAMICA DELL'U-OWC	32
6 MONITORAGGIO DELL'IMPIANTO REWEC3 DI CIVITAVECCHIA	34
6.1 APPARATO STRUMENTALE	34
6.2 OSSERVAZIONE DELL'IMPIANTO E COMPORTAMENTO DELL'IMPIANTO REWEC3 DI CIVITAVECCHIA	39
7 CONCLUSIONI.....	44
8 APPENDICE	45
8.1 I RISULTATI DELLA PRIMA FASE DELL'ESPERIMENTO	48
8.2 CONFRONTO TRA LE RISPOSTE ASSOCIATE ALL'EQ. (A.2) E EQ. (A.3).	49
8.3 I RISULTATI DELLA SECONDA FASE DELL'ESPERIMENTO: CONFRONTO CON I DATI DI UN U-OWC OPERATIVO.....	50
9 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	54

Sommario

Il documento fornisce una descrizione delle attività svolte nell'ambito del progetto "Monitoraggio e sviluppo di algoritmi per l'ottimizzazione dell'energia prodotta da un OWC in scala 1:1". Tale progetto ha l'obiettivo di sviluppare una strategia per l'ottimizzazione delle performance di un dispositivo REWEC3 equipaggiato con una turbina di Wells e implementare un sistema di monitoraggio dell'impianto REWEC3 installato presso il porto di Civitavecchia. Nella prima parte del report si fornisce una breve descrizione delle caratteristiche meteo-marine del sito, una panoramica sulla modellazione analitica del dispositivo e una descrizione generale del prototipo. Quindi, la strategia di controllo è discussa in dettaglio. In particolare, si paragonano strategie di controllo onda-onda e stato di mare per stato di mare sviluppate nel dominio del tempo e si dimostra che l'accoppiamento con un sistema di monitoraggio del clima ondoso permette di migliorare le prestazioni del dispositivo in tempo reale.

Successivamente, si descrive il sistema di monitoraggio installato presso il cassone nel Porto di Civitavecchia. Il sistema include una batteria di trasduttori di pressione installati all'interno dell'impianto. I sensori permettono di misurare pressioni all'interno della colonna d'acqua, nella camera d'aria e in corrispondenza dell'imboccatura esterna. Tale sistema fornisce misure dirette ed indirette della forzante e della risposta del sistema. Inoltre, una turbina di Wells è installata in corrispondenza di una cella. Il report mostra storie temporali ottenute direttamente dai dati registrati in situ ed il post-processing delle registrazioni.

1 Introduzione

I dispositivi REWEC3 sono convertitori di energia propagata dalle onde di mare. Essi appartengono alla famiglia degli Oscillating Water Column (OWC) ed hanno la peculiarità di essere dotate di un condotto ad U che collega la colonna oscillante con il mare aperto. Essi sono dotati di turbine auto-rettificanti per la produzione di energia elettrica (tipicamente turbine di Wells). Lo sviluppo del dispositivo ha visto sia fasi di analisi teorica che sperimentale, che hanno portato a definire modelli per il calcolo della risposta e verifiche sperimentali delle performance dell'impianto su modelli in piccola/media scala [1-5].

Di recente costruzione è l'impianto prototipo di Civitavecchia [6]. Tale impianto è oggetto del presente Accordo di Programma ed è utilizzato per raggiungere i seguenti obiettivi:

- Monitorare due celle indipendenti del REWEC3 tramite sensori atti a misurare pressioni e livelli idrici all'interno dell'impianto
- Sviluppare algoritmi di controllo della turbina installata nel REWEC3.

La finalità di questo lavoro è lo sviluppo dei codici di calcolo da utilizzare durante le fasi operative di un generico impianto REWEC3. Tali codici permetteranno di migliorare le performance energetiche dell'impianto adattando la dinamica della turbina installata nella camera di assorbimento ai particolari stati di mare incidenti. In parallelo, si esegue il monitoraggio di due celle indipendenti al fine di misurare le performance dell'impianto e migliorare la qualità dei modelli di calcolo proposti in letteratura sulla base di sole prove su modello.

Nelle sezioni seguenti, si propone un inquadramento generale del progetto Civitavecchia e una breve descrizione dei modelli per il calcolo della risposta di un REWEC3. Tali dati saranno impiegati nello sviluppo del sistema di controllo. Successivamente, saranno descritti il sistema di monitoraggio e le relative misure.

In aggiunta, si propone una appendice riguardante un nuovo modello di calcolo sviluppato recentemente tramite prove su modello fisico.

2 Inquadramento generale del clima ondoso

2.1 Inquadramento geografico e clima al largo

La stima dell'energia disponibile sottocosta necessita la predisposizione di studi specialistici per propagazione del moto ondoso dal largo verso la riva. A tal fine risulta fondamentale procedere preliminarmente all'inquadramento geografico del paraggio, ivi compresa l'analisi preliminare dei dati disponibili. Le fasi di studio mediante modello numerico sono infatti sempre precedute da un'attività di raccolta e processamento di tutti i dati disponibili. La fig. 1 mostra la carta nautica dell'IGM del tratto di mare antistante il porto di Civitavecchia da cui sono state estratte le curve batimetriche utilizzate come input della successiva modellazione bidimensionale della propagazione delle onde. A tale proposito, viene inoltre indicato il punto in corrispondenza del quale è disponibile il moto ondoso, che è utilizzato come base per la successiva analisi finalizzata alla propagazione del moto ondoso sottocosta e alla stima della energia ondosa disponibile in un punto posto nei pressi del porto di Civitavecchia.

In particolare, per quanto attiene il clima meteomarinario al largo, vengono utilizzati i dati forniti dal modello sviluppato dall' ENEA [7]. Questo modello calcola le condizioni del moto ondoso al largo (onde di mare vivo e onde swell) sulla base di dati meteorologici (campi di vento). In questo caso il punto di estrazione del moto ondoso ha le seguenti coordinate: Latitudine 42,075°N, Longitudine 11,6875°E.

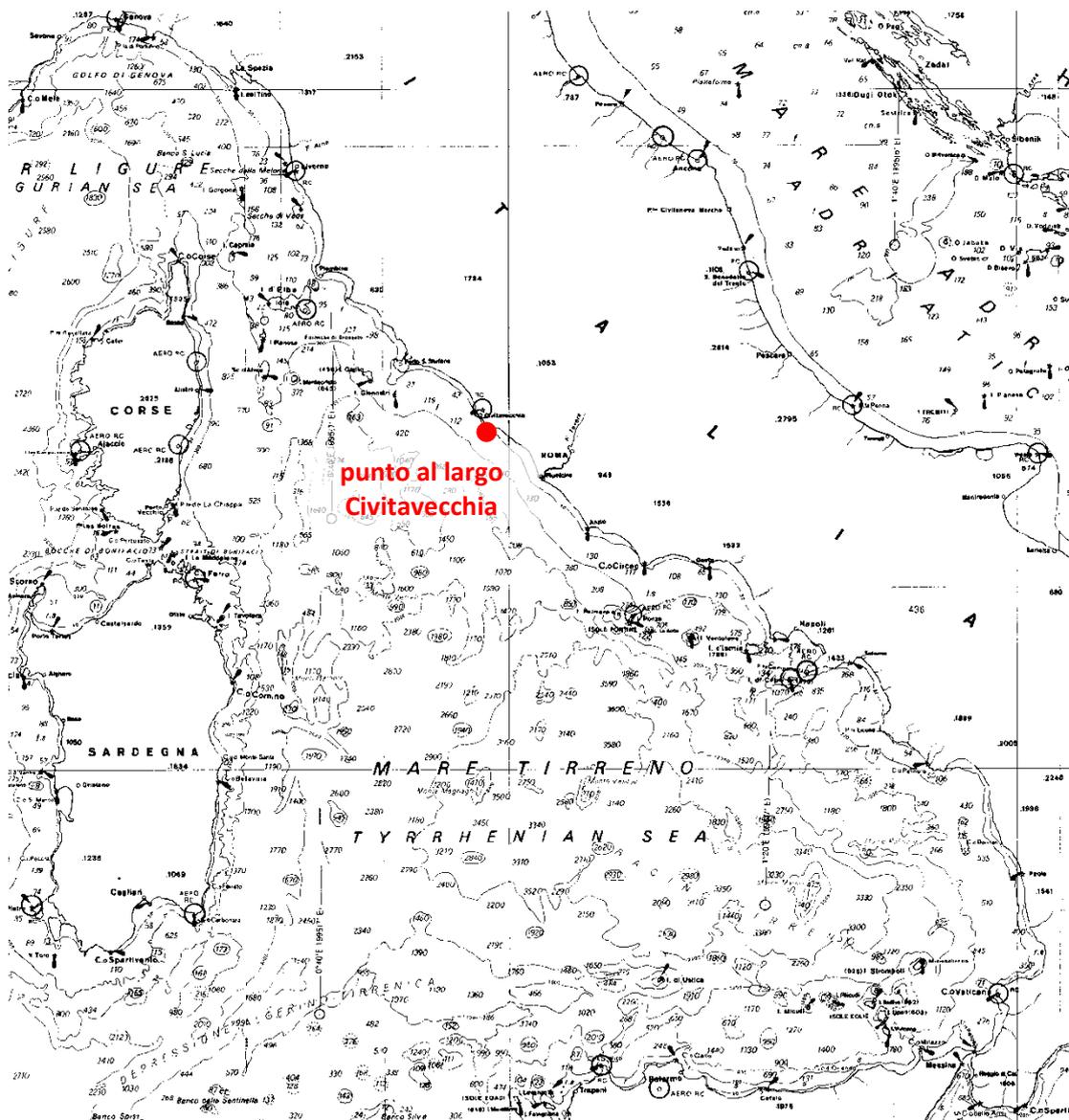


Figura 1. Carta nautica del Tirreno con indicazione del punto in cui sono disponibili i dati di moto ondoso al largo di Civitavecchia.

I dati triorari di clima ondoso vengono raggruppati in classi di altezza d’onda significativa, direzione di provenienza e periodo medio. Per ciascuna classe viene determinata la frequenza di apparizione media, definita come il rapporto tra il numero di eventi ricadenti nella generica classe ed il numero totale di eventi disponibili. Inoltre viene definito, per il paraggio di Civitavecchia, il settore di traversia delle onde, ovvero l’intero settore direzionale da cui possono arrivare le onde, che nel presente caso risulta essere compreso tra 140°N e 310 °N. Di conseguenza sono state escluse dalle analisi finalizzate alla propagazione del moto ondoso sotto costa, tutte le onde provenienti da direzioni esterne al settore di traversia così definito, per le quali è stata assunta una altezza d’onda trascurabile. In sostanza, sono stati scartati tutti i dati per i quali la direzione di propagazione evidenziava onde provenienti da terra.

La procedura descritta consente di ottenere il clima medio annuo, mostrato in fig. 2 nella classica rappresentazione a rosa con intervalli direzionali di 10°. Come si può osservare le onde più alte e frequenti provengono da Sud-Ovest. Rilevanti risultano anche essere i marosi provenienti da Sud.

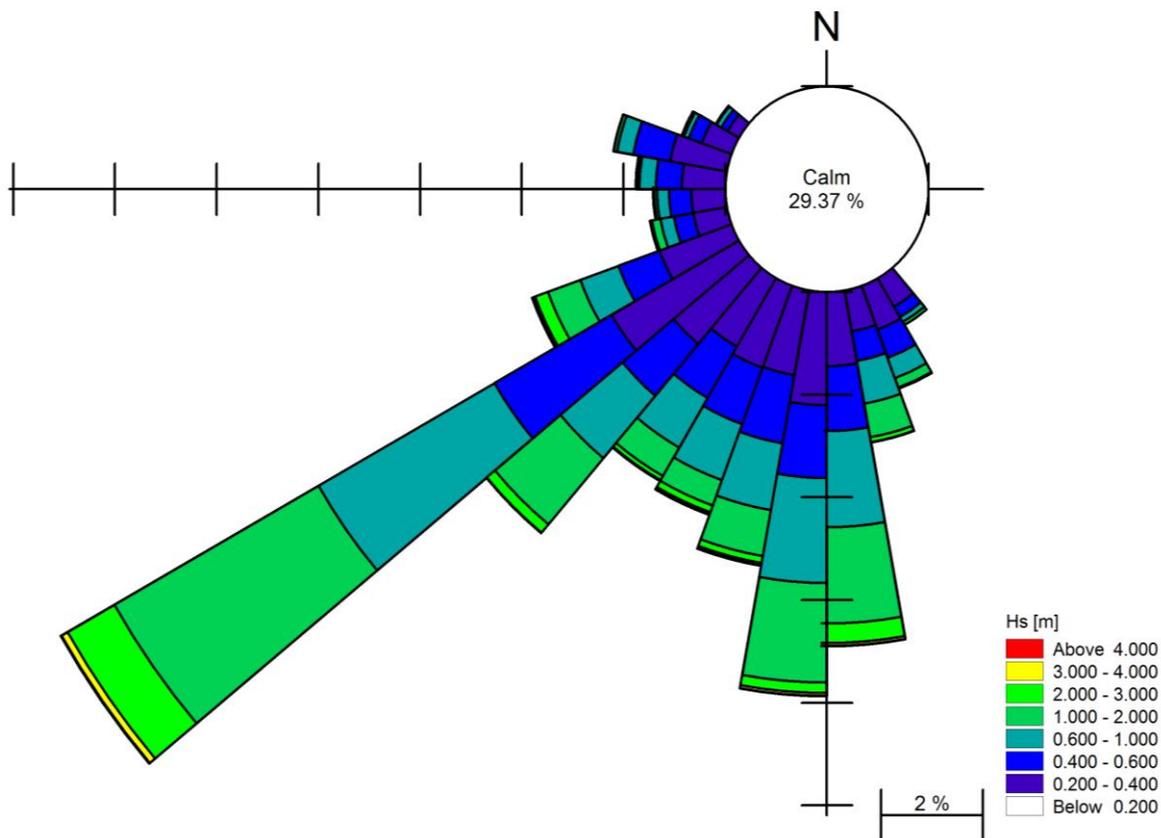


Figura 2. Clima ondoso al largo nel punto della griglia ENEA 42,075°N, 11,6875°E, significativo del tratto di costa in esame.

2.2 Propagazione del clima ondoso sottocosta

Poiché i dati forniti dal modello ondometrico dell'ENEA sono attendibili fino a profondità elevate, è risultato necessario uno studio della trasformazione dell'onda in modo da ottenere la frequenza di apparizione delle onde sottocosta. Tale studio della evoluzione del clima ondoso dal largo fino a riva è eseguito mediante l'applicazione di un modello bidimensionale di propagazione delle onde.

Sulla base dei dati caratteristici del clima ondoso al largo (H_s , direzione, periodo), viene utilizzato il modulo MIKE 21 SW al fine di determinare, attraverso l'approccio spettrale, la variazione dell'onda nella sua propagazione verso riva per effetto dell'attrito con il fondo, dell'irripidimento (shoaling), della rifrazione e del frangimento. Tale codice di calcolo rappresenta ad oggi lo stato dell'arte tra i modelli numerici di propagazione del moto ondoso e può essere considerato a tutti gli effetti uno standard in Italia come all'estero.

In particolare, MIKE 21 SW è un modello spettrale per vento ed onde di nuova generazione, basato su una griglia non strutturata. Il modello simula la trasformazione di onde generate dal vento ed onde di swell sia offshore, sia in aree costiere. Questo modello include due differenti formulazioni: "Directional decoupled parametric" e "Fully spectral". La prima delle due formulazioni è basata su una parametrizzazione dell'equazione di conservazione dell'energia del moto ondoso. La parametrizzazione è effettuata nel dominio della frequenza mediante l'introduzione come variabili dipendenti del momento di ordine zero e del momento di primo ordine dello spettro [8]. La seconda formulazione è basata sulla conservazione dell'energia del moto ondoso come descritta da Komen, *et al.* [9] e Young [10]. I fenomeni fisici che sono modellati con MIKE 21 SW sono i seguenti:

- Generazione dell'onda ad opera del vento;
- Interazione non lineare onda-onda;
- Dissipazione dovuta al cosiddetto "white capping"

- Dissipazione dovuta all'attrito con il fondo;
- Dissipazione dovuta al frangimento;
- Rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni del fondale;
- Diffrazione e riflessione diretta;
- Interazione onde-correnti.

Il modello adottato utilizza come dominio di calcolo una griglia numerica a maglia triangolare (flexible mesh), con elementi infittiti nelle zone di maggior interesse. A tal proposito la fig. 3 riporta la batimetria in input al modello, con la rappresentazione degli elementi triangolari tipici della "Flexible Mesh". Come si può osservare, la risoluzione della maglia è stata gradualmente incrementata procedendo verso nell'area di maggior interesse, quella antistante il porto di Civitavecchia. Al fine di evidenziare al meglio tale zona, la fig. 4 mostra un dettaglio delle aree a maggiore infittimento della griglia di calcolo.

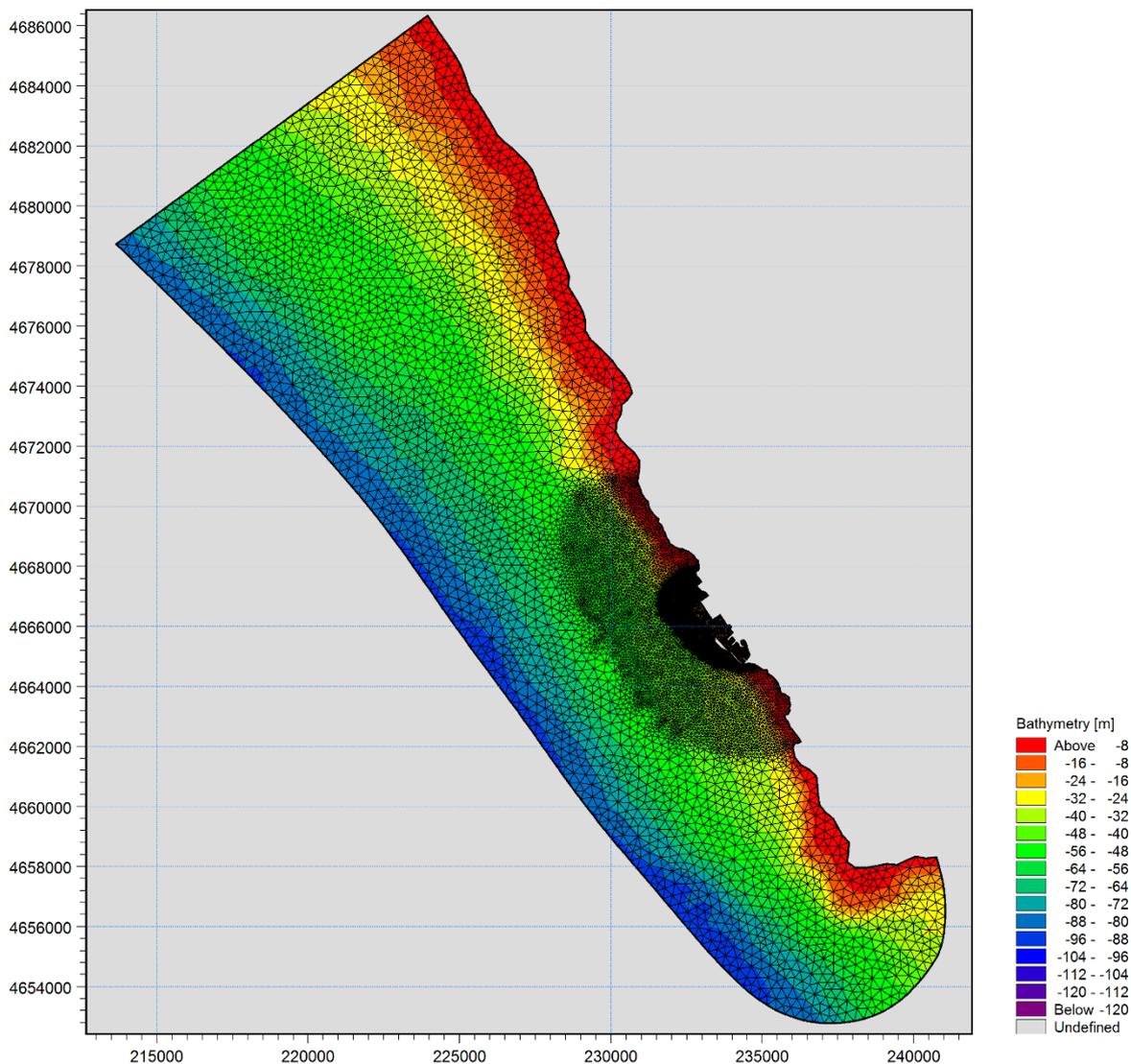


Figura 3. Rappresentazione della griglia di calcolo utilizzata per il modello di trasformazione dell'onda MIKE 21 SW, in cui è mostrata la batimetria del fondale.

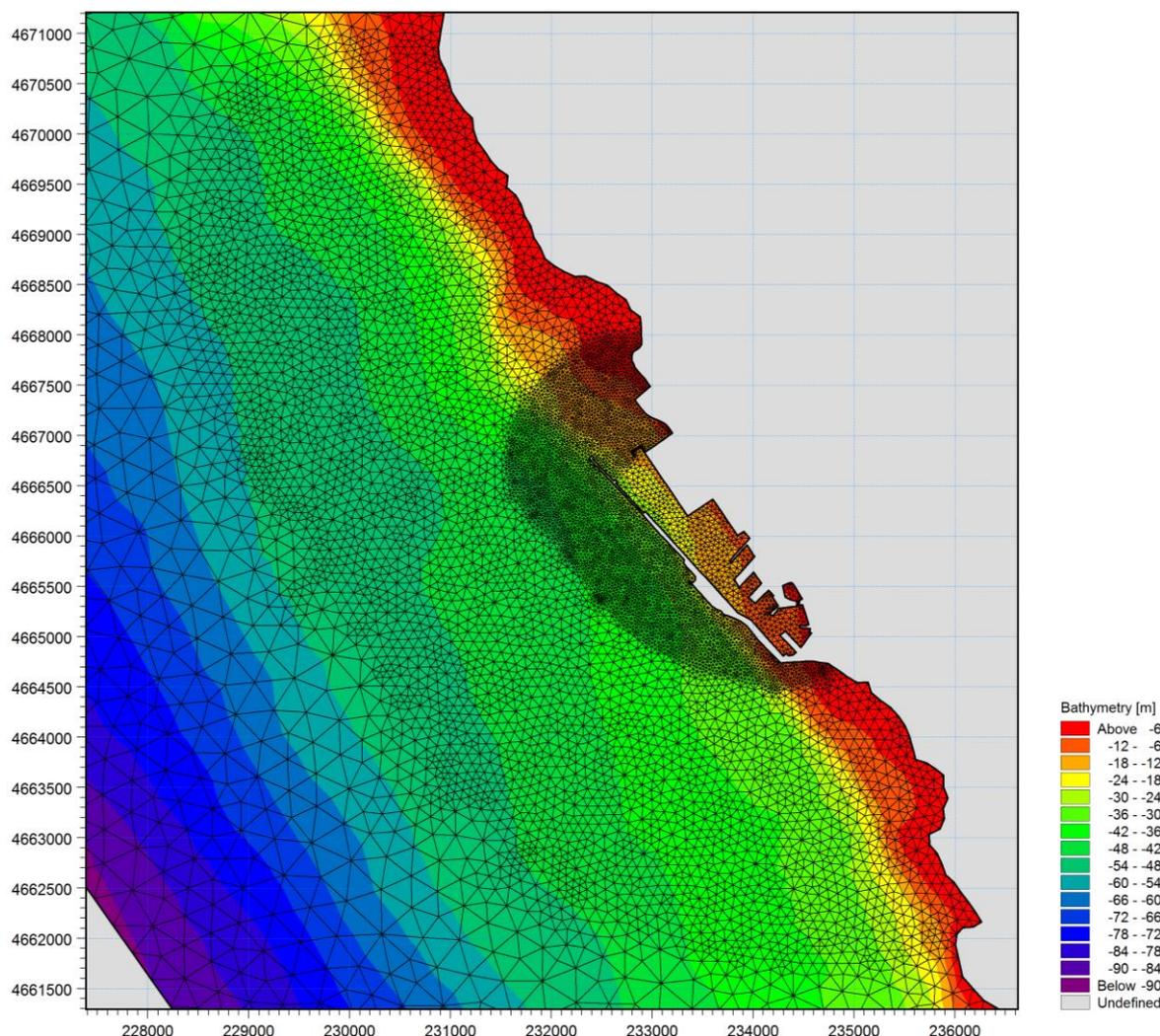


Figura 4. Griglia utilizzata per il modello di trasformazione dell'onda MIKE 21 SW. Vista planimetrica del tratto di maggiore interesse per lo studio.

2.3 Propagazione del clima ondoso sottocosta

Per ogni condizione ondosa considerata il modello utilizzato fornisce la distribuzione planimetrica delle principali caratteristiche del moto ondoso, ovvero altezza d'onda significativa e direzione di provenienza, il periodo delle onde è infatti ipotizzato uniforme su tutto il dominio di calcolo. A titolo di esempio viene mostrata (in fig. 5) la distribuzione della altezza d'onda significativa per uno stato di mare tipo proveniente da sud.

Sono stati simulati 790 stati di mare rappresentativi del clima medio. I risultati sono stati estratti in un punto antistante la zona in cui è previsto l'allungamento della diga di sopraflutto a profondità di circa 33m, come mostrato in fig. 6.

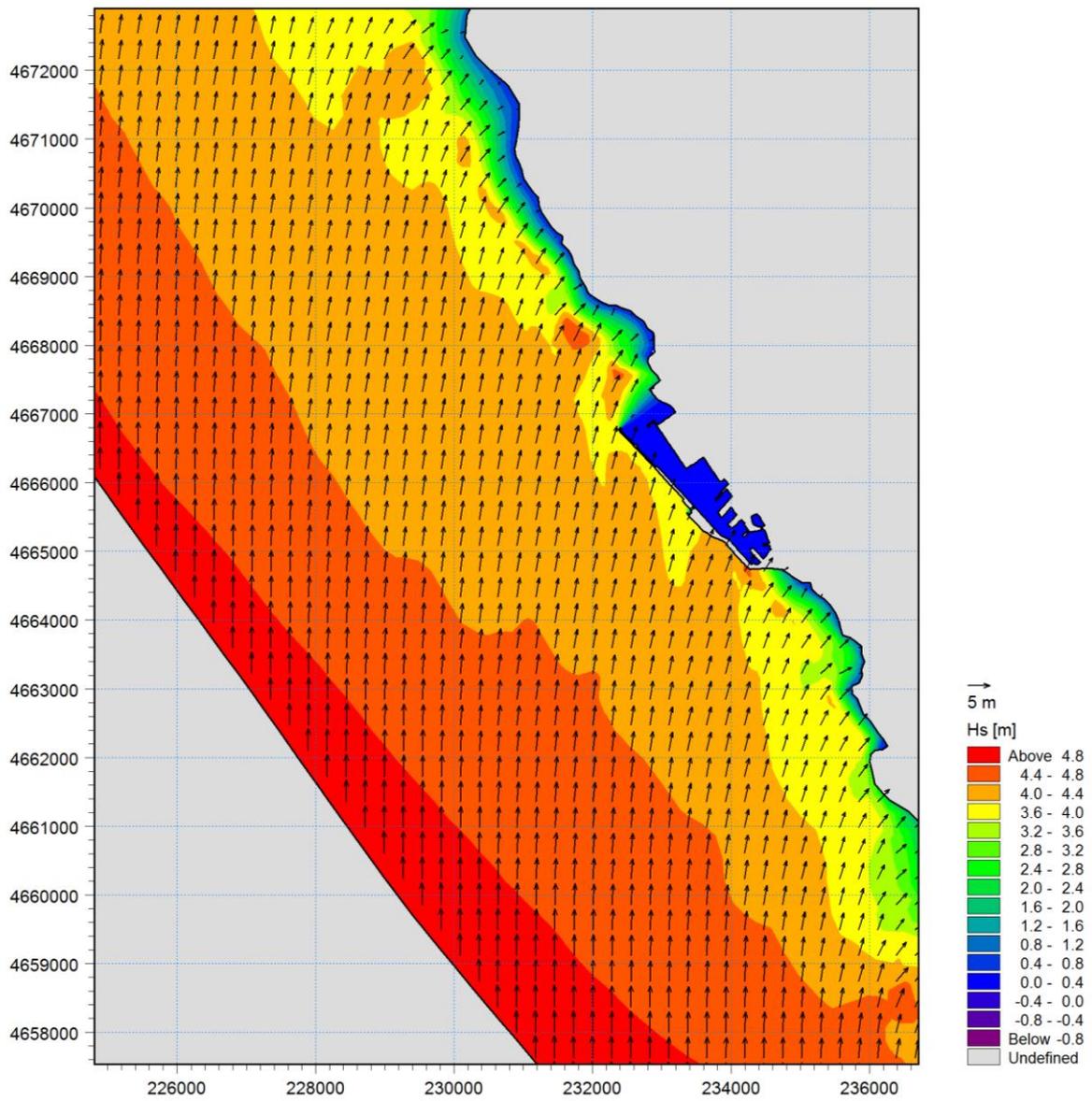


Figura 5. Distribuzione della altezza d'onda significativa (Hs) per un evento ondoso tipo proveniente da Sud.

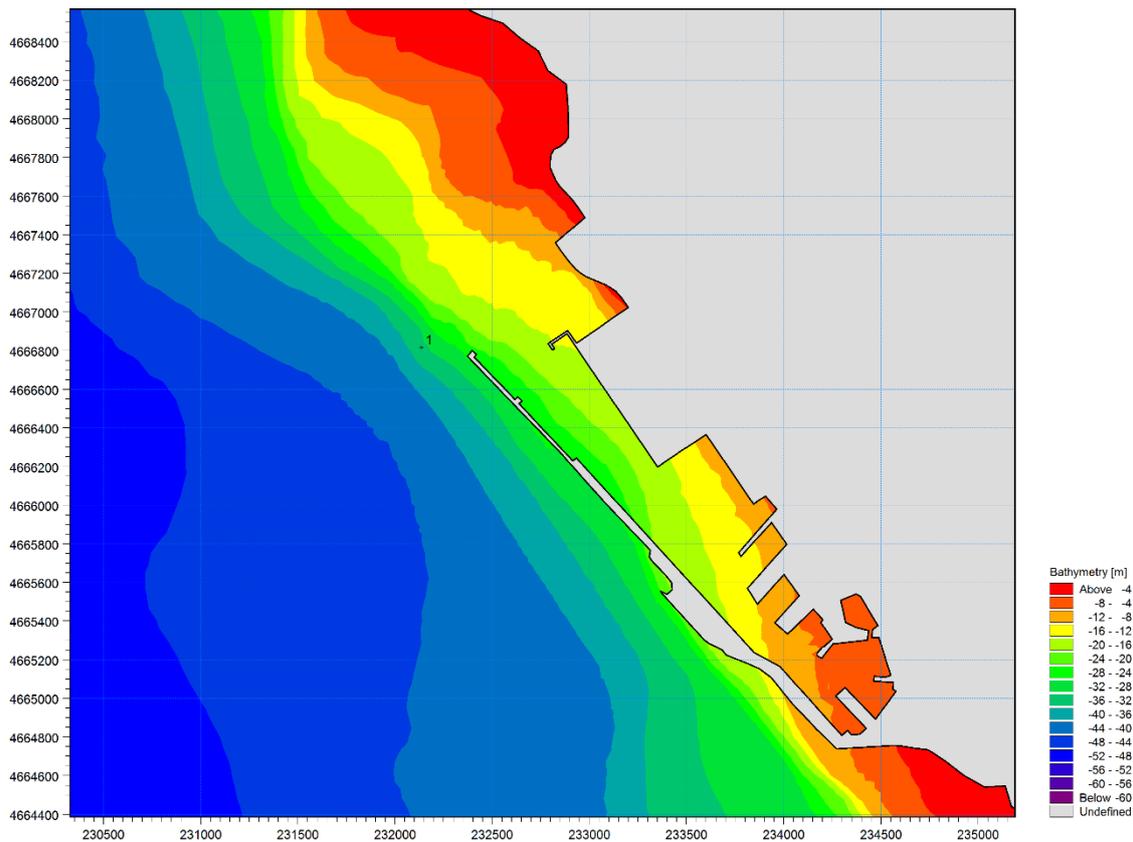


Figura 6. Individuazione del punto di estrazione del clima ondoso sottocosta.

La fig. 7 riporta la rosa del clima ondoso caratteristico trasferito sottocosta per il punto considerato. Da tale risultato si evidenzia che le onde più alte e frequenti continuano a provenire da Sud-Ovest, senza modifiche di rilievo rispetto ai dati al largo.

Al contrario i marosi provenienti da Sud subiscono una sostanziale riduzione della loro altezza; allo stesso tempo si verifica una variazione nella distribuzione direzionale della loro frequenza, a causa del fenomeno della rifrazione delle onde non ortogonali alle linee batimetriche, con particolare riferimento a quelle con direzione di provenienza minore di $180^\circ N$ in quanto sub-parallele alla costa.

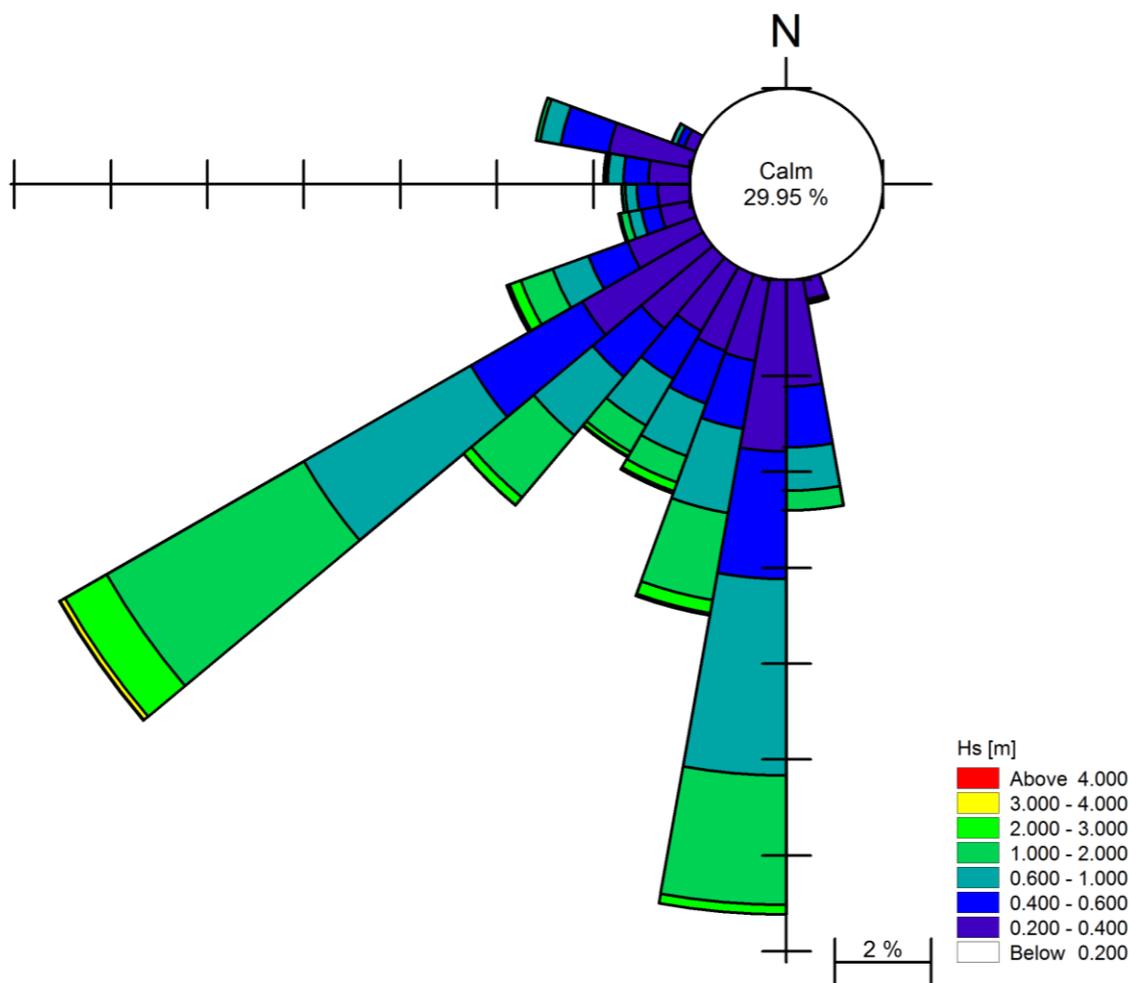


Figura 7. Clima ondoso sottocosta nel antistante la zona in esame, su profondità di 33m rispetto al livello di quiete.

2.4 Stima dell'energia disponibile sottocosta

L'analisi delle caratteristiche del moto ondoso sottocosta evidenzia una riduzione più o meno intensa delle altezze d'onda al variare delle direzioni di propagazione. In modo analogo ci si aspetta una corrispondente riduzione della energia del moto ondoso.

La procedura seguita per il calcolo del flusso di energia disponibile sottocosta nelle aree campione è la seguente: i dati di altezza d'onda significativa e periodo medio di ciascun evento rappresentativo del clima ondoso trasposto è utilizzato per stimare la potenza mediante la formulazione:

$$P = \frac{1,15 \rho g^2 H_s^2 T_m}{64\pi} \tag{1}$$

Al fine di poter considerare il flusso di energia complessivo, legato all'intero clima medio, ciascun valore della potenza è moltiplicato per la corrispondente frequenza di apparizione allo scopo di ottenere il flusso di energia, ovvero l'energia media per unità di lunghezza, misurato in kW/m. Tale procedura viene ripetuta separatamente per le classi di direzione di provenienza in cui è stato discretizzato il clima medio, ottenendo un flusso di energia totale sottocosta pari a 2,1 kW/m.

Il set di dati così derivati, ovvero il flusso di energia associato ad ogni evento rappresentativo del clima medio, consente inoltre di analizzare l'andamento del flusso di energia in relazione alle principali caratteristiche del moto ondoso, ovvero la direzione di provenienza e l'altezza d'onda. Tali analisi sono di fondamentale importanza nelle fasi di scelta e progettazione dei sistemi di sfruttamento dell'energia

ondosa. In particolare la fig. 8 mostra la analisi direzionale del flusso di energia, invece nella fig. 9 è presente il grafico del flusso di energia e della potenza in funzione della altezza d'onda significativa. Quest'ultimo risultato consente di fornire una diretta cognizione della energia disponibile associata alle varie condizioni ondose tipo e contemporaneamente delle possibili caratteristiche progettuali dell'impianto di sfruttamento dell'energia ondosa.

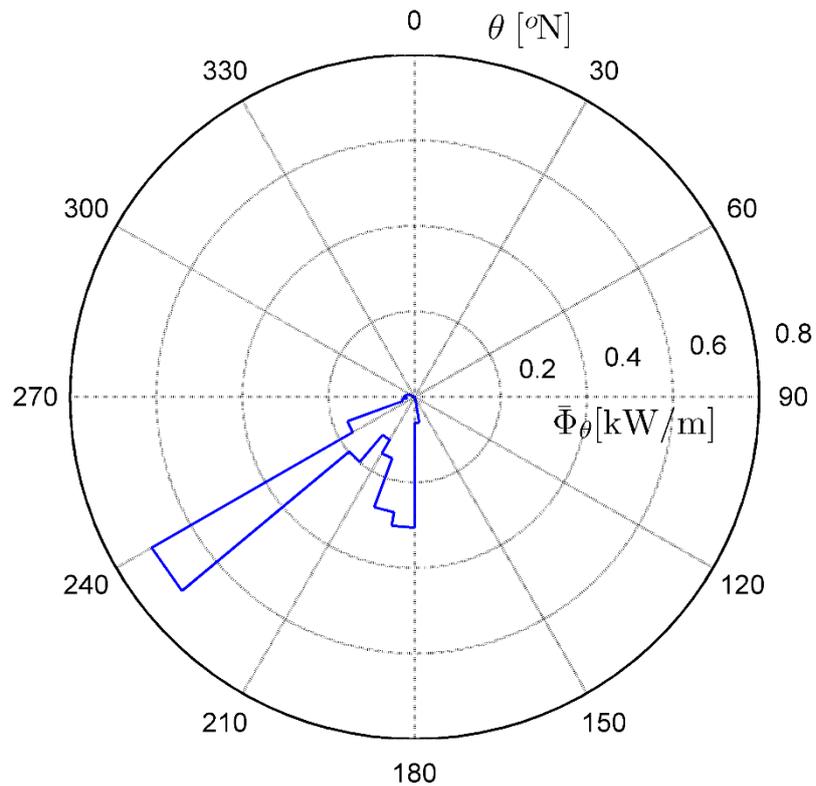


Figura 8. Flusso di energia sottocosta in funzione della direzione di provenienza delle onde.

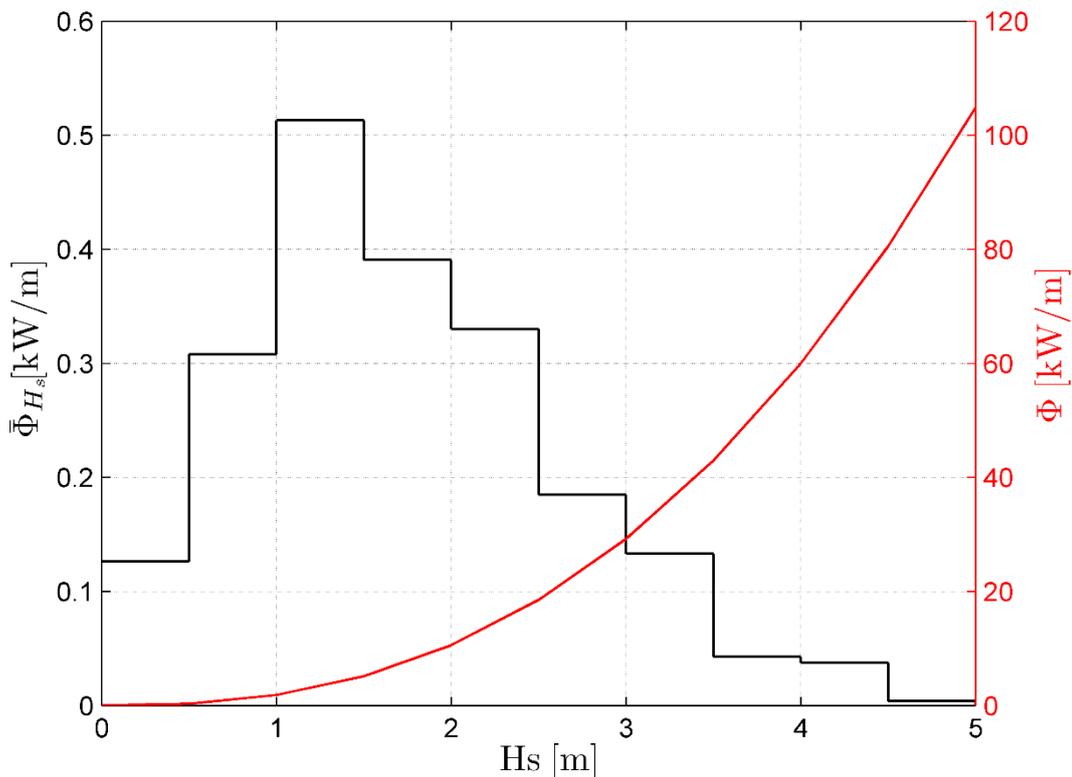


Figura 9. Andamento del flusso di energia sottocosta e della potenza in funzione della altezza significativa delle onde.

3 Modellazione analitica del dispositivo U-OWC

In figura 10 è riportato lo schema relativo alla configurazione geometrica dell’impianto U-OWC. La camera pneumatica ha altezza h_c , e larghezza b_2 e b_3 nella direzione trasversale e longitudinale, rispettivamente. Il condotto verticale, la cui apertura si trova a profondità h rispetto la superficie libera, ha lunghezza l_i e larghezza b_1 . La dinamica del sistema è descritta dalle misure istantanee di x e p_c , le quali indicano, rispettivamente, la quota idrica misurata rispetto il livello medio dell’acqua e la pressione dell’aria all’interno della camera pneumatica.

Dal punto di vista della modellazione matematica, il dispositivo U-OWC rappresenta un sistema dinamico multi-modale, descritto dal movimento congiunto della fase di aria ed acqua. La prima interpretazione teorica della dinamica dell’U-OWC è stata sviluppata da Boccotti [3] e successivamente rivisitata da Malara e Arena [5] con l’inclusione della formulazione rigorosa per la modellazione del campo di onde diffratto in prossimità dell’impianto. Entrambi i modelli assumono che l’idrodinamica del sistema sia derivata nell’ipotesi di moto mono-dimensionale per un fluido viscoso incompressibile: di conseguenza, il movimento della colonna d’acqua oscillante è interpretato come la traslazione verticale di un pistone rigido, in accordo con la pratica utilizzata per i dispositivi OWC tradizionali [11]. Infine, si assume un modello termico adiabatico reversibile per la descrizione della aerodinamica della camera pneumatica[12].

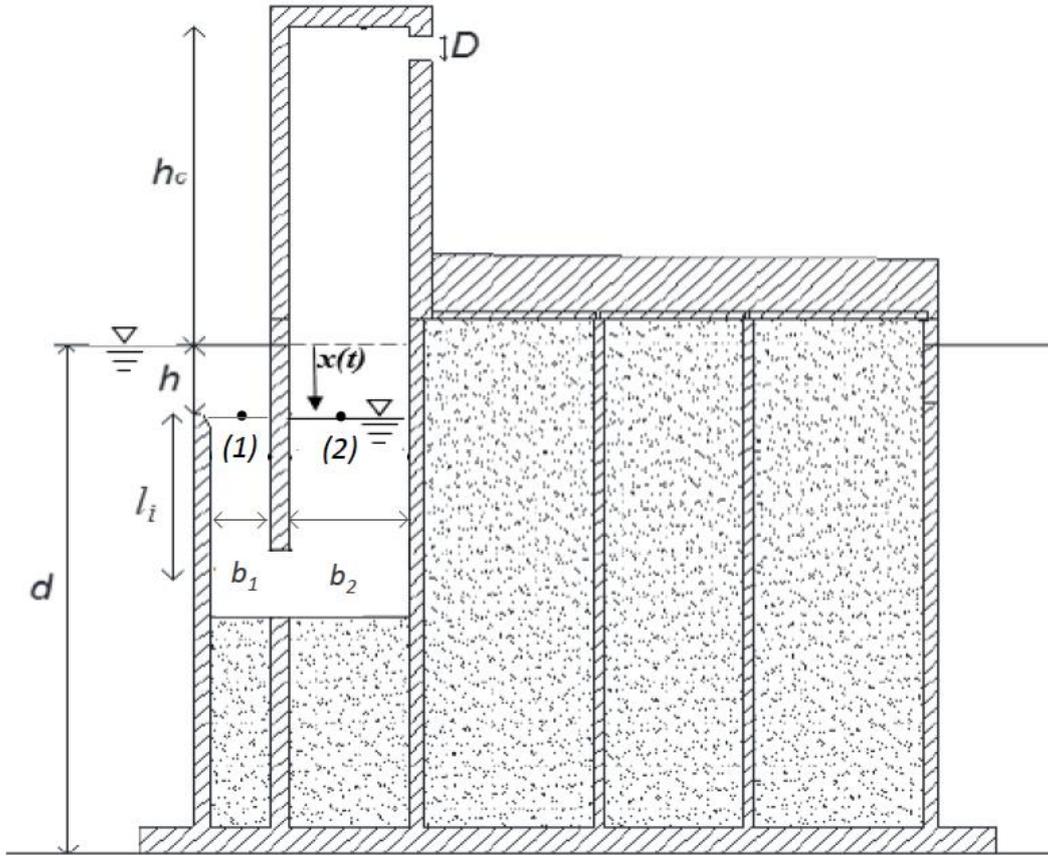


Figura 10. Rappresentazione schematica dell'impianto U-OWC

3.1 Modello Boccotti

Si descrive in questa sezione il modello teorico derivato da Boccotti [3]. Con riferimento alla figura 10, si assume che il punto (1) sia rappresentativo di una qualsiasi particella sulla superficie della colonna oscillante, nell'ipotesi di traslazione rigida dell'acqua. Applicando l'equazione di continuità al volume di fluido nell'U-OWC si ottiene la velocità $v(t)$ della generica particella di acqua:

$$v(t) = \frac{b_2}{b_1} \dot{x}(t) \quad (2)$$

Applicando il teorema di Bernoulli tra i punti (1) e (2) si ottiene:

$$-\frac{1}{g} \dot{x} [l_i + h_c - x(t)] \ddot{x}(t) - \frac{1}{g} \frac{b_2}{b_1} \dot{x}(t) = H_1 - H_2 - \Delta H_w \quad (3)$$

dove g è l'accelerazione di gravità e b_1 , b_2 , l_i ed h_c parametri geometrici definiti in figura 1. In equazione 1, i termini al primo membro rappresentano la somma dei rapporti tra l'accelerazione dell'acqua nei tratti del condotto ad U e l'accelerazione di gravità, moltiplicata per il percorso medio. Al secondo membro figurano le perdite idrauliche in corrispondenza ai punti 1 e 2 (cft. Figura 10), indicati con H_1 ed H_2 rispettivamente, mentre ΔH_w indica la perdita totale lungo il percorso dell'acqua. Questi termini sono calcolati come segue:

$$H_1 = \frac{\Delta p(t)}{\rho g} \quad (4)$$

$$H_2 = -x(t) + \frac{1}{2g} \dot{x}^2(t) + \frac{p_c(t) - p_{atm}}{\rho g} \quad (5)$$

$$\Delta H_w = \left(\frac{\lambda_w}{4R} l' + K_w \right) \frac{|v(t)|}{2g} v(t) \quad (6)$$

Qui, $\Delta p(t)$ rappresenta la sollecitazione del sistema, data dal valore istantaneo della pressione dell'acqua a profondità $-h$, p_{atm} la pressione dell'aria in condizioni atmosferiche, ρ la densità dell'acqua, R il raggio idraulico del condotto verticale, λ_w il coefficiente che esprime le perdite continue, posto pari a 0.025, K_w il coefficiente delle perdite localizzate, posto pari a 0.75. La deduzione del valore numerico di K_w è stata effettuata per mezzo di confronti con dati sperimentali [4] misurati su un modello in scala ridotta di un U-OWC presso il laboratorio naturale NOEL di Reggio Calabria (<http://www.noel.unirc.it/>).

Si passa adesso alla descrizione della componente aerodinamica del modello. La densità dell'aria è derivata in funzione alle condizioni dinamiche nella camera pneumatica. Chiamando M_a la massa di aria intrappolata nella camera, risulta:

$$\rho = \frac{M_a}{b_2 b_3 [h_c - x]} \quad (7)$$

La legge politropica esprime il legame tra il valore istantaneo di pressione e la densità dell'aria nella camera pneumatica, in accordo con la legge seguente:

$$\rho = \rho_{atm} \left(\frac{p_c}{p_{atm}} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (8)$$

Il coefficiente k indica il rapporto tra il calore specifico a pressione costante e il calore specifico a volume costante. Seguendo la pratica utilizzata per la modellazione degli OWC convenzionali [12], si assume che il processo sia adiabatico reversibile. In questo caso il coefficiente k assume il valore 1.4. Gli effetti di compressibilità dell'aria sono inclusi applicando l'equazione di Eulero tra le condizioni nella camera pneumatica e l'atmosfera, ottenendo la seguente equazione:

$$(K_{tube} + K_{turbine}) \frac{u_a^2}{2} \frac{u_a}{|u_a|} = \frac{p_{atm}}{\rho_{atm}} \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_c}{p_{atm}} \right)^{\frac{1}{k}} - 1 \right], \quad (9)$$

dove u_a indica la velocità dell'aria nel tubo, K_{tube} il coefficiente che quantifica le perdite localizzate nel tubo, $K_{turbine}$ il coefficiente che esprime le perdite attraverso la turbina. Infine, la variazione nel tempo della massa di aria M_a intrappolata nella camera è data da:

$$\frac{dM_a}{dt} = -\rho_{mean} \frac{\pi}{4} (D^2 - D_{int}^2) u_a, \quad (10)$$

dove ρ_{mean} indica il valore medio della densità dell'aria tra le condizioni dinamica della camera pneumatica e quelle atmosferiche.

Per risolvere la dinamica del sistema U-OWC, le equazioni (3), (9) e (10) sono integrate numericamente a partire dalle seguenti condizioni iniziali:

$$x(0) = 0; \quad \dot{x}(0) = 0; \quad M_a(0) = \rho_{atm} b_2 b_3 h_c \quad (11)$$

insieme alla definizione della sollecitazione $\Delta p(t)$. La descrizione rigorosa del processo $\Delta p(t)$ richiede la risoluzione del problema dell'interazione tra il campo di onde e la struttura. Boccotti propone una metodologia semplificata che approssima la soluzione del campo di onde non-omogeneo per mezzo di una procedura iterativa, volta alla determinazione del coefficiente di diffrazione β . Nello specifico, assumendo un valore unitario per il coefficiente di riflessione, si ottiene:

$$\beta = (2 - A) \quad (12)$$

dove A indica il coefficiente di assorbimento, definito dal rapporto tra il flusso medio di energia, per unità di larghezza, dell'onda incidente $\bar{\Phi}_0$ ed il flusso medio di energia assorbito da una singola cella $\bar{\Phi}_p$. In formule:

$$A = \frac{\overline{\Phi}_p}{\overline{\Phi}_0} \quad (13)$$

Definito β , la sollecitazione $\Delta p(t)$ è calcolata a partire dalla definizione del processo in campo indisturbato $\Delta p_0(t)$:

$$\Delta p(t) = \beta \Delta p_0(t) \quad (14)$$

La caratterizzazione del processo $\Delta p_0(t)$ è effettuata applicando l'algoritmo FFT (Fast Fourier Transform) a partire dalla conoscenza dello spettro di frequenza dell'onda incidente $S(\omega)$ [13].

3.2 Modello Malara-Arena

Il modello teorico proposto da Boccotti è basato sulla rappresentazione approssimata del campo di onde diffratte in prossimità della struttura. Sebbene questa interpretazione fornisca una stima corretta delle statistiche della risposta dinamica dell'U-OWC, la formulazione rigorosa del campo di moto di fronte la struttura permette di ottenere la diretta soluzione dei processi che governano la dinamica dell'U-OWC senza ricorrere alle iterazioni necessarie per la stima della sollecitazione. Seguendo l'approccio utilizzato nella pratica dei corpi galleggianti [14], la soluzione rigorosa per il campo di onde dinnanzi l'impianto è sviluppata da Malara e Arena [5] nell'ambito della teoria lineare delle onde di mare. Questo approccio prevede la sovrapposizione delle tre componenti di onde: incidente, scatterato e radiato. Tale formulazione riprende il modello descritto nella sezione precedente, applicando l'equazione di Bernoulli al volume di fluido oscillante. Da qui, il processo $\Delta p(t)$ è decomposto nei seguenti contributi:

$$\Delta p(t) = \Delta p^{(s)}(t) + \Delta p^{(r)}(t) \quad (15)$$

dove Δp^s e Δp^r indicano, rispettivamente, la componente scatterata e radiata del campo di onde. In questa formulazione, la sollecitazione dell'impianto è data dal processo Δp^s , mentre la soluzione per il processo Δp^r è inclusa nella forma finale della equazione del moto. Nello specifico, combinando l'equazione 15 con l'equazione 3, si ottiene l'equazione integro-differenziale espressa nella forma di Cummins [15]:

$$M(x)\ddot{x} + C(\dot{x})\dot{x} - \frac{1}{g}\rho\frac{b_2}{b_1}\int_0^t \dot{x}(t-\tau)\mathbf{K}_0(0,-h,\tau)d\tau + x + \frac{p_c - p_{atm}}{\rho g} = -\frac{\Delta p^{(s)}}{\rho g} \quad (16)$$

qui, i contributi di massa e smorzamento sono esplicitati come segue:

$$M(x) = \frac{1}{g}\left(\frac{b_2}{b_1}l_i + l_i + h_c + \frac{b_2}{b_1}H_\infty - x\right) \quad (17)$$

$$C(\dot{x}) = \frac{1}{2g}\left(-\dot{x} + \frac{b_2^2}{b_1^2}K_w|\dot{x}|\right) \quad (18)$$

dove H_∞ indica la massa aggiunta a frequenza infinita e K_0 la funzione di ritardo che include gli effetti memoria del sistema. In questa formulazione, le perdite proporzionali al termine λ_w sono trascurate, a causa del loro ridotto effetto sulla dinamica del sistema. Infine, l'equazione (16) è accoppiata alle equazioni (10) e (9) per descrivere il movimento congiunto della fase di aria ed acqua.

La soluzione del sistema di equazioni (9), (10) e (16) è ottenuta per mezzo di un algoritmo numerico che fornisce la soluzione nel dominio del tempo, a partire dalle seguenti condizioni iniziali:

$$x(0) = 0; \quad \dot{x}(0) = 0; \quad p_c(0) = p_{atm} \quad (19)$$

Come già anticipato, la sollecitazione è rappresentata dalla componente Δp^s del processo $\Delta p(t)$. Questa è calcolata applicando l'algoritmo FFT, a partire dalla definizione dello spettro di frequenza [13]:

$$S_{\Delta p^{(s)}} = (\rho g)^2 S(\omega) \cdot \left| \sum_{m=0}^{\tilde{m}} \frac{B^{(D)}_m}{\cos(\alpha_m h) \cosh(\alpha_m b_1)} \right|^2, \quad (20)$$

dove gli m termini α_m indicano le soluzioni della equazione di dispersione direzionale seguente:

$$\alpha \tan(\alpha h) = -\frac{\omega^2}{g}, \quad (21)$$

con ω frequenza angolare e $B^{(D)}_m$ coefficienti ottenuti come soluzioni di un sistema algebrico lineare. La descrizione esaustiva di questo metodo è fornita in [5].

3.3 Stima della potenza meccanica prodotta dall'impianto

Il valore istantaneo della potenza meccanica P_m prodotta dal sistema dipende dalla caduta di pressione in corrispondenza della turbina, per mezzo dell'efficienza:

$$eff = \frac{P_m}{Q \cdot (p_c - p_{atm})} \quad (22)$$

dove Q indica il flusso di volume di aria attraverso la turbina, dato dal rapporto tra la portata massica w_t attraverso la turbina e la densità dell'aria ρ . Nell'ipotesi di comportamento lineare per la turbina, come per il caso di turbine Wells, w_t è calcolato come segue[16]:

$$w_t(t) = \Omega \cdot (p_c - p_{atm}) \quad (23)$$

dove Ω è un coefficiente che dipende dalla geometria e dalle specifiche meccaniche della turbina[17]:

$$\Omega = \frac{A}{K_{turbine} NR} \quad (24)$$

essendo A la superficie netta attraversata dall'aria attraverso la turbina, R il raggio del tubo, N la velocità di rotazione della turbina misurata in *rad/s* e $K_{turbine}$ una costante che quantifica le perdite attraverso la turbina. Informazioni riguardanti la stima del coefficiente $K_{turbine}$ per diverse tipologie di turbine sono disseminate in letteratura. Per i dispositivi a colonna d'acqua oscillante, le turbine di tipo Wells sono sicuramente le più diffuse. Per queste, la dettagliata descrizione numerica è stata sviluppata da Curran e Gato [17], i quali hanno fornito gli abachi che restituiscono i valori di efficienza e del coefficiente $K_{turbine}$, in funzione delle seguenti quantità adimensionali:

$$U^* = \frac{u_a}{NR} \quad (25)$$

$$\Delta p^*_{chamber} = \frac{p_c - p_{atm}}{\rho_{atm} N^2 R^2} \quad (26)$$

In pratica, $K_{turbine}$ è assunto pari alla pendenza della retta che approssima la curva $U^* - \Delta p^*_{chamber}$, mentre il valore istantaneo di efficienza è calcolato ad ogni passo della risoluzione numerica della risposta dinamica dell', in funzione del valore istantaneo di U^* . Infine, il la serie temporale ottenuta $P_m(t)$ è integrata lungo la durata della simulazione T :

$$\bar{P}_m = \frac{1}{T} \int_0^T P_m(t) dt \quad (27)$$

ottenendo la potenza meccanica media prodotta dal sistema.

3.4 Equazione turbina-generatore

La descrizione completa del processo di conversione di energia richiede l'inclusione degli effetti dovuti alla presenza del generatore. Introducendo l'inerzia della turbina J , il modello che permette di accoppiare il meccanismo dinamico della parte attiva del dispositivo (costituito dalla colonna d'acqua oscillante e dalla camera pneumatica) insieme alle caratteristiche del generatore è interpretato dalla seguente formulazione:

$$T_m - T_g = J \frac{dN}{dt}, \quad (28)$$

dove T_m è il momento torcente meccanico, calcolato a partire dalla misura di potenza meccanica istantanea P_m :

$$T_m = \frac{P_m}{N}, \quad (29)$$

e T_g è il momento torcente imposto dal generatore. Tale valore è calibrato sulla base di una strategia di controllo volta all'ottimizzazione delle prestazioni dell'impianto. Tale strategia avrà il compito di impostare alla turbina la velocità rotazionale N_{ref} che corrisponde alla massima produzione di potenza, per fissate caratteristiche della sollecitazione.

4 Prototipo di impianto U-OWC presso il Porto di Civitavecchia: descrizione generale del progetto

Il porto di Civitavecchia (Roma, Italia) è attualmente interessato dalla realizzazione di importanti opere di ampliamento infrastrutturale. Il complesso dei lavori denominati "prolungamento dell'antemurale C. Colombo, darsene servizi e traghetti" sono in corso di esecuzione, appaltati al raggruppamento di imprese con capofila Grandi Lavori Fincosit S.p.A. (che comprende: Impresa Pietro Cidonio S.p.A., CoopSette sc, Itinera SpA). Nell'ambito delle opere di ampliamento, la tecnologia degli innovativi cassoni REWEC3 è stata adottata dall'Autorità Portuale di Civitavecchia per la realizzazione di una parte della diga foranea di sovraflutto per un'estensione complessiva di circa 560m. E' stata adottata la tecnologia REWEC3 (U-OWC) come soluzione innovativa rispetto alle tradizionali dighe verticali, per il miglioramento della sicurezza della fruibilità dell'infrastruttura portuale nei confronti delle tracimazioni delle onde incidenti.

Un impianto di tipo REWEC3 (REsonant Wave Energy Converter) o U-OWC, brevettato dal prof. Paolo Boccotti, per la conversione di energia ondosa in energia elettrica è costruttivamente molto simile ad una tradizionale diga portuale a cassoni cellulari, in cui la parte lato mare è opportunamente modificata per consentire lo sfruttamento dell'energia associata al moto ondoso incidente.

Uno schema di tale tipo di struttura è riportato in Figura 11. Il cassone modificato è costituito da un condotto verticale (1) interagente con il moto ondoso incidente mediante un'imboccatura superiore. Tale condotto è, poi, collegato ad una camera di assorbimento (3) attraverso una luce di fondo (2). La camera di assorbimento è posta in contatto con l'atmosfera mediante un condotto (5) nel quale è alloggiata una turbina self-rectifying (6). Perciò, la camera di assorbimento contiene massa d'acqua (3) nella parte inferiore e una sacca d'aria (4) nella parte superiore. Per effetto del campo di moto ondoso interagente con la struttura, si generano sull'imboccatura del condotto verticale delle fluttuazioni di pressione, le quali determinano delle oscillazioni all'interno della massa d'acqua contenuta nel condotto e nella camera di assorbimento, corrispondenti alle fasi di cresta e di cavo d'onda. Conseguentemente la sacca d'aria all'interno della camera di assorbimento (4) viene alternativamente compressa ed espansa, generando una corrente alterna all'interno del condotto (5) che collega la camera con l'atmosfera, capace di mettere in funzione la turbina self-rectifying (6).

Rispetto ai tradizionali sistemi OWC (Oscillating Water Column) di conversione di energia ondosa, i REWEC sono delle vere e proprie dighe portuali con un tubo ad U (costituito dal condotto verticale e dalla camera di assorbimento) nella parte anteriore della diga lato mare; pertanto possono essere considerati degli U-OWC nei quali, però, le onde non entrano all'interno della struttura ma agiscono da forzante per instaurare il moto di compressione e decompressione della sacca d'aria all'interno dell'impianto. Tali impianti innovativi brevettati da Boccotti [18], rispetto ai classici OWC, risultano essere molto più convenienti in termini sia di fattibilità che di produzione di energia.

Un confronto tra i tradizionali OWC e gli U-OWC ha mostrato, inoltre, come gli ultimi consentono di assorbire una quantità di energia ondosa molto maggiore di quella dei classici OWC sia per gli stati di mare più intensi interagenti con la struttura che per quelli più deboli [4].

Inoltre, da un punto di vista tecnologico tali impianti U-OWC non presentano addizionali e significative complessità costruttive rispetto a quelle di una classica diga foranea a parete verticale. La struttura dell'impianto, infatti, è essenzialmente quella di classica diga a cassoni cellulari in c.a., con le celle che possono essere riempite di inerti o di calcestruzzo ed il muro paraonde che si porta alla stessa altezza di

una diga. L'unica innovazione è costituita dal tubo ad U in c.a., costituito dal condotto verticale e dalla camera di assorbimento, che ha un polmone d'aria collegato all'atmosfera per mezzo di un condotto.

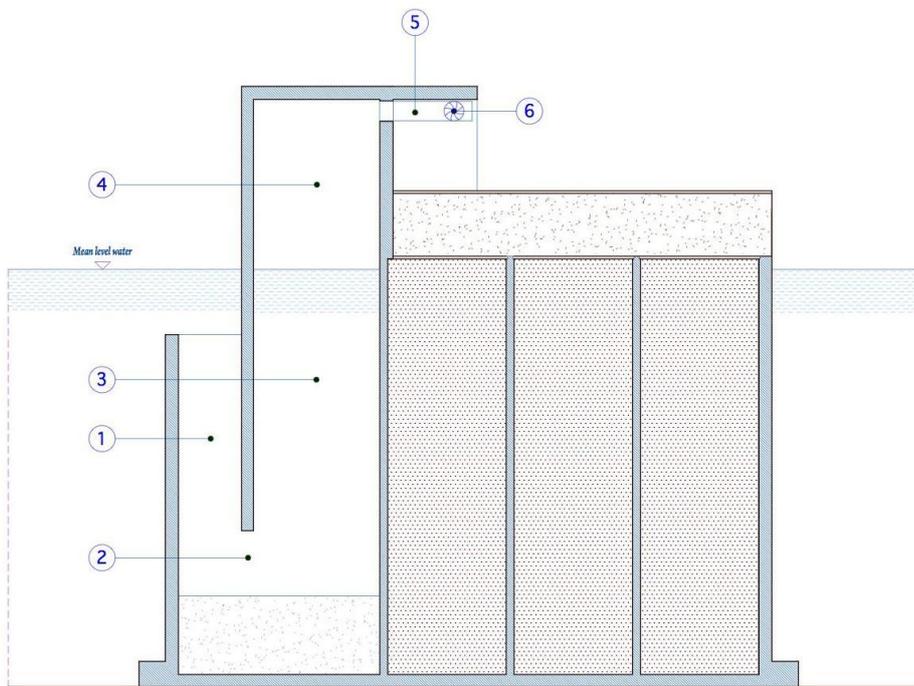


Figura 11. – Sezione di impianto REWEC3 (U-OWC) incorporato in una diga a parete verticale.

Il progetto U-OWC a scala 1:1 in corso di realizzazione presso il Porto di Civitavecchia “prolungamento dell’antemurale C. Colombo, darsene servizi e traghetti”, prevede la realizzazione di 17 cassoni REWEC3 (vedi figure 12, 13 e 14). I lavori sono in corso di ultimazione e i cassoni sono stati già tutti costruiti.

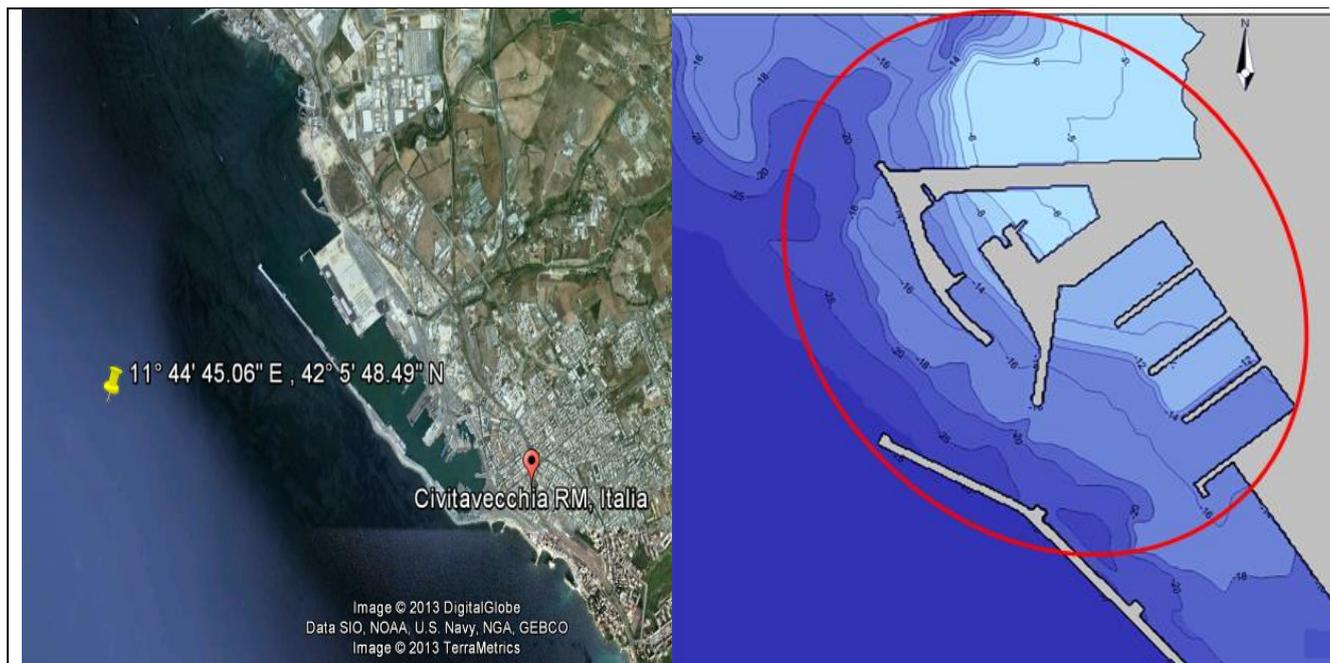


Figura 12. Il Porto di Civitavecchia nel 2011 (pannello di sinistra) e il layout del progetto dopo la realizzazione dei nuovi cassoni REWEC3. (pannello di destra).

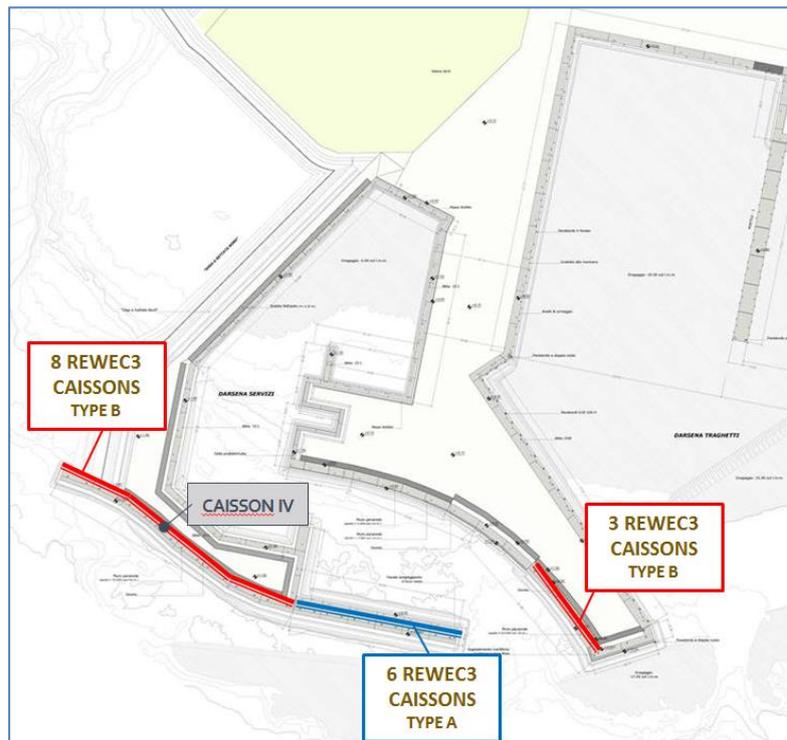


Figura 13. – Planimetria dei lavori di ampliamento del Porto di Civitavecchia, incluso la realizzazione dei cassoni REWEC3 in corso di costruzione.

La dislocazione planimetrica dei cassoni U-OWC per la conversione dell'energia ondosa incidente è riportata in Figura 13. Figura 14, invece, illustra alcune fasi di avanzamento dei lavori di realizzazione della porzione di molo di sovraflutto realizzata mediante i cassoni U-OWC. L'ultima immagine è relativa all'avanzamento attuale dei lavori con il posizionamento di tutti i 17 cassoni U-OWC.

La figura 15, invece, mostra la sezione verticale e la pianta di un cassone REWEC3 a Civitavecchia. In particolare, ogni cassone REWEC3 è lungo 33,94 metri e comprende 8 celle indipendenti (condotto verticale e da camera pneumatica) per l'assorbimento, ciascuna di 3.87m di lunghezza. Il condotto verticale è largo 1,60 m e la quota dell'apertura del condotto ad U è posta a 2,00 m sotto il lmm, in modo che non si scopra mai sotto l'azione degli stati di mare più frequenti. Invece, la camera pneumatica ha una larghezza di 3,20 m. La geometria delle parti attive del REWEC è stata progettata con l'obiettivo di massimizzare la quantità di energia ondosa incidente assorbita dalla singola cella attiva. La parte passiva del REWEC3 ricorda quella delle classiche dighe a parete verticale in cemento armato, al fine di garantire la stabilità complessiva della struttura.

Nell'ambito del progetto Civitavecchia, WAVENERGY.IT s.r.l. – Spin-off dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria - ha curato gli aspetti relativi alla progettazione dei cassoni REWEC3 e si sta occupando delle attività di supporto alla realizzazione degli stessi (in qualità di licenziataria esclusiva del brevetto dei cassoni REWEC3).

I costi per la realizzazione dei cassoni REWEC3 sono stati interamente coperti dall'Autorità Portuale di Civitavecchia (APC) tramite fondi del governo italiano (CIPE, "Legge Obiettivo"). La scelta dell'adozione dei cassoni REWEC3 si è fondata sui vantaggi della nuova tecnologia come struttura di protezione portuale, a prescindere dalla possibilità di utilizzarlo per la produzione di energia elettrica dalle onde del mare. In effetti, il REWEC3 integrato in una diga frangiflutti a parete verticale dimostra essere più efficiente per l'assorbimento dell'energia ondosa incidente rispetto alle altre soluzioni esistenti. L'assorbimento dell'energia incidente, riduce, infatti, il fenomeno della riflessione davanti ad una classica opera a parete verticale. Pertanto, il REWEC3 è attualmente in costruzione senza turbina, generatore o qualsiasi altra

componente elettro / meccanica utilizzata per produrre energia elettrica. Tuttavia, le infrastrutture in corso di realizzazione, una volta ultimate saranno pronte per l'installazione di adeguati sistemi di PTO per consentire la produzione di energia elettrica dall'energia ondosa assorbita.



Figura 14. – Alcune immagini dell'avanzamento dei lavori di costruzione dei cassoni REWEC3 nel Porto di Civitavecchia. Pannello superiore: Maggio 2014; pannello centrale: Marzo 2015; pannello inferiore: Settembre 2016.

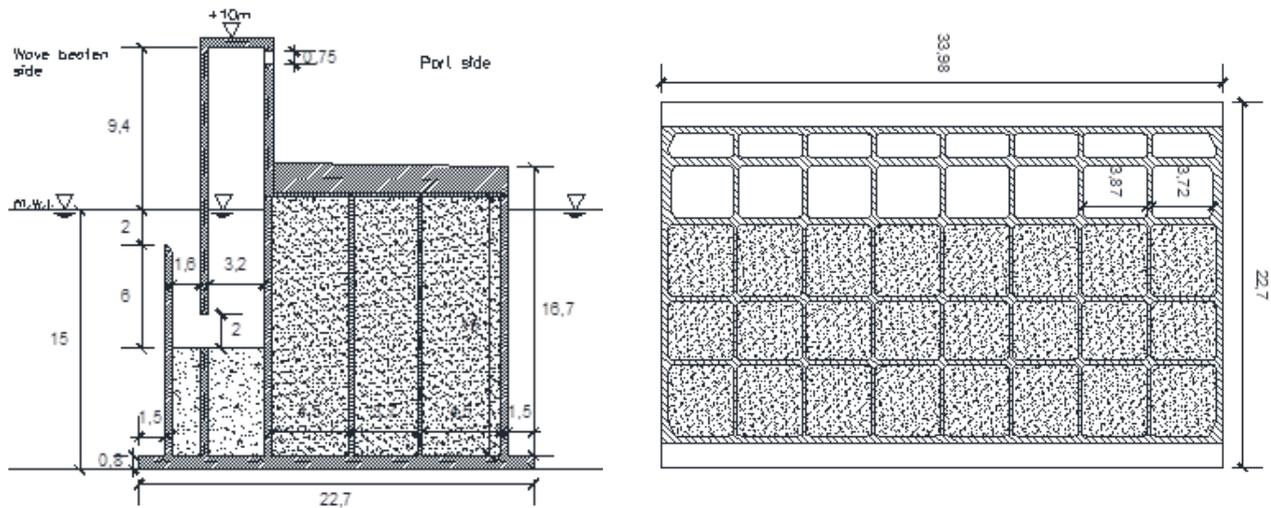


Figura 15. Sezione verticale e pianta dei cassoni REWEC3 presso il Porto di Civitavecchia.

5 Strategie di controllo

5.1 Legge di controllo sul momento torcente applicato dal generatore

Nelle sezioni precedenti si è fornita la descrizione analitica relativa alla modellazione della dinamica del sistema U-OWC. Inoltre, si è fornita l'equazione che accoppia il funzionamento della meccanica della camera pneumatica e della colonna d'acqua oscillante con le specifiche del generatore. Come anticipato, il calcolo del momento torcente applicato dal generatore alla turbina richiede l'implementazione di algoritmi di controllo, che hanno l'obiettivo di manovrare il funzionamento della turbina. Nel caso in esame, il meccanismo di controllo applicato avrà il compito di sintonizzare la velocità di rotazione della turbina sul valore di riferimento N_{ref} , che esprime le condizioni di operatività desiderate. Di conseguenza, T_g è calcolato come funzione dell'errore tra la misura istantanea della velocità della turbina N ed il valore desiderato N_{ref} , per mezzo di una costante di proporzionalità K_p :

$$T_g = K_p [N - N_{ref}] \quad (30)$$

Lo schema di figura 16 riassume il flusso di calcolo che interpreta il sistema accoppiato tra generatore e parte attiva dell'impianto.

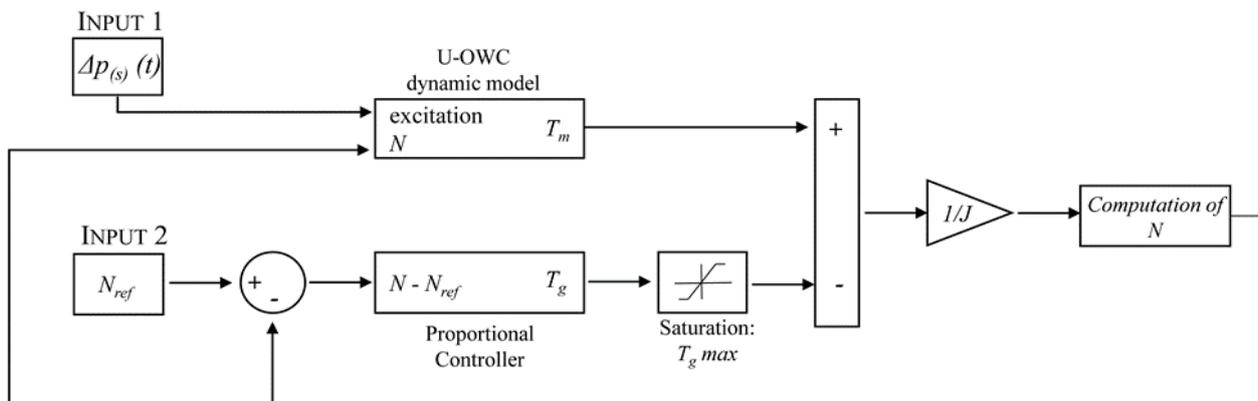


Figura 16. Rappresentazione schematica del modello di calcolo che accoppia la meccanica del generatore con la dinamica della parte attiva dell'U-OWC, formata da colonna d'acqua oscillante e camera pneumatica. L'input Nref è associato alla velocità rotazione della turbina che ottimizza e prestazioni dell'impianto.

Il valore della costante K_p è ottenuto per mezzo di una procedura iterativa che punta alla minimizzazione delle oscillazioni della velocità rotazionale istantanea rispetto alla velocità di riferimento; il valore ottimale

di N_{ref} è stimato tramite l'applicazione di strategie di controllo che hanno l'obiettivo di massimizzare l'output di potenza elettrica prodotta dall'impianto. La strategia di controllo avrà quindi la funzione di spingere l'impianto al punto di massima produzione quando il sistema lavora in condizioni ondose che sono lontane da quelle di progetto, per le quali il sistema è stato dimensionato. Tale aspetto è cruciale nel caso di sistemi che operano in condizioni di sollecitazione aleatoria, come rappresentato dal caso delle onde di mare. Nella presente applicazione, gli algoritmi implementati si pongono come l'obiettivo quello di individuare la velocità della turbina che restituisce il massimo valore di potenza prodotta in corrispondenza alle diverse condizioni ondose che sollecitano l'impianto. Nello specifico, si propone il confronto tra due approcci. Il primo algoritmo di controllo riceve come input le caratteristiche stocastiche del campo di onde incidente, con riferimento alla lunghezza di uno stato di mare. In questo caso, la velocità N_{ref} è mantenuta costante per tutta la durata dello stato di mare. Questa strategia è basata sull'algoritmo MPPT (Maximum Power Point Tracking), che spinge la dinamica dell'impianto a riprodurre le condizioni definite dai punti di funzionamento ottimale della turbina, individuati per diverse caratteristiche della sollecitazione. La seconda delle strategie proposte è fondata su un controllo operato sulla base della dinamica attuale del sistema: il valore N_{ref} è calibrato in funzione delle misure condotte in tempo reale delle condizioni dinamiche all'interno della camera pneumatica. Tali risultati sono discussi in dettaglio anche da Strati, *et al.* [19].

5.2 Identificazione della costante della legge di proporzionalità K_p

La costante che definisce il legame proporzionale tra il momento torcente applicato dal generatore e l'errore tra la velocità attuale ed il valore di riferimento [eq. (30)] è determinata per mezzo di una procedura iterativa. Il valore di K_p adottato sarà quello che minimizza le oscillazioni della velocità istantanea N intorno al valore di riferimento N_{ref} . A fine di osservare l'effetto delle diverse forme spettrali sulla scelta della costante, si considerano due stati di mare rappresentativi, rispettivamente, di onde tipiche generate dal vento e onde di mare lungo. I parametri spettrali relativi ai due stati di mare sono scelti con riferimento alle caratteristiche del clima ondoso del sito oggetto di studio. Le coppie H_s-T_p per i due stati di mare sono riportate in tabella 1. Per ciascun caso si calcola la risposta dinamica del sistema, adottando un valore costante per la velocità di riferimento N_{ref} . Tale calcolo è effettuato per diverse velocità N_{ref} , scelte nell'intervallo [2000-6000] rpm (giri/min), e diversi valori assunti per la costante K_p . Al fine di individuare il valore di K_p che conduce al funzionamento ottimale, si valuta la media e la deviazione standard del processo $N(t)$ ottenuto dalla risoluzione numerica della dinamica dell'U-OWC. Così facendo, da un lato si fornisce una prova di validità sulla scelta della legge di controllo proporzionale per il calcolo di T_g , dimostrando la capacità dell'eq. (30) di mantenere il valore medio di N vicino al valore di riferimento N_{ref} , lungo tutta la durata dello stato di mare; dall'altro, si valuta il valore di K_p che minimizza le oscillazioni di N attorno al valore N_{ref} . La figura 17 mostra i risultati ottenuti per la deviazione standard di N , quando K_p assume i seguenti valori:

$$\begin{aligned} K_p &= -10; \\ K_p &= -20; \\ K_p &= -50; \end{aligned} \tag{31}$$

Alla luce dei risultati ottenuti, si adotta $K_p = -10$. Ulteriori informazioni pertinenti al caso $K_p = -10$ sono riportate in tabella 2. Nello specifico, si riporta la media ottenuta per il processo $N(t)$ nei due stati di mare analizzati. Come si osserva, la legge di controllo proporzionale implementata è in grado di mantenere la velocità attuale della turbina intorno al valore desiderato.

Tabella 1. Parametri spettrali degli stati di mare analizzati per identificare il valore ottimale della costante K_p . H_s , T_p e T_e indicano l'altezza significativa, il periodo di picco e il periodo energetico dello spettro, rispettivamente.

Stato di mare	H_s [m]	T_p [s]	T_e [s]
1	2.68	6.97	1.42
2	2.14	20.58	5.53

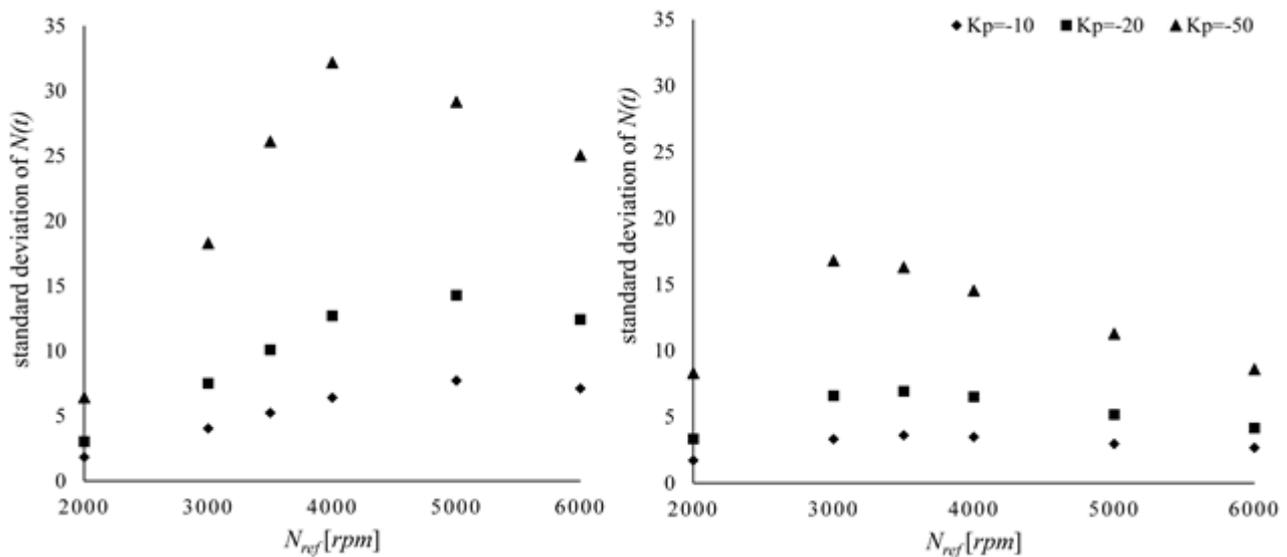


Figura 17. Deviazione standard del valore istantaneo della velocità rotazionale della turbina N per tre valori della costante della legge di controllo K_p . Con riferimento alla tabella 1, i risultati sono riferiti allo stato di mare 1 (sinistra) e 2 (destra).

Tabella 2. Valore medio della velocità rotazionale della turbina istantanea, calcolata lungo la durata della simulazione, con $K_p = -10$. I risultati mostrano come l'equazione x sia in grado di sintonizzare la velocità istantanea N intorno al valore di riferimento N_{ref} .

N_{ref} [rpm]	$N(t)$ media	
	Stato di mare 1	Stato di mare 2
2000	2007.66	2010.95
3000	3029.62	3035.41
3500	3545.92	3547.11
4000	4063.31	4054.74
5000	5086.12	5052.81
6000	6077.99	6040.38

5.3 Generazione dell'input

In questa applicazione, la dinamica dell'impianto è calcolata adottando il modello descritto nella sezione 3.2. Come anticipato, la sollecitazione data dalla componente scatterata del campo di onde dinnanzi la struttura è ottenuta per mezzo della trasformata FFT a partire dalla realizzazione dello spettro di frequenza [eq. (20)]. Quest'ultimo è generato, per fissato stato di mare, sulla base dei valori di altezza significativa (H_s) e periodo di picco (T_p). Al fine di verificare la validità degli algoritmi di controllo proposti, occorre simulare che l'impianto operi in maniera continuativa per una durata di tempo corrispondente alla successione di un certo numero di stati di mare. Nel caso in esame, la successione di coppie H_s-T_p è ottenuta a partire da misure del campo di onde registrate presso il laboratorio NOEL, successivamente adattate alla località in esame per mezzo della similitudine di Froude [20]. La procedura è la seguente: il processo $\Delta p^{(s)}_{NOEL}$ è misurato in campo indisturbato a profondità di 2 m, con frequenza di campionamento di 10 Hz e durata di 5 min, associata alla durata dello stato di mare. Successivamente, le misure $\Delta p^{(s)}_{NOEL}$ sono scalate in similitudine di Froude con un fattore scala $\lambda=1:7$. Dalle misure scalate si individuano le coppie H_s-T_p , per un totale di 126 stati di mare. La distribuzione delle coppie H_s-T_p è riportata in figura 18.

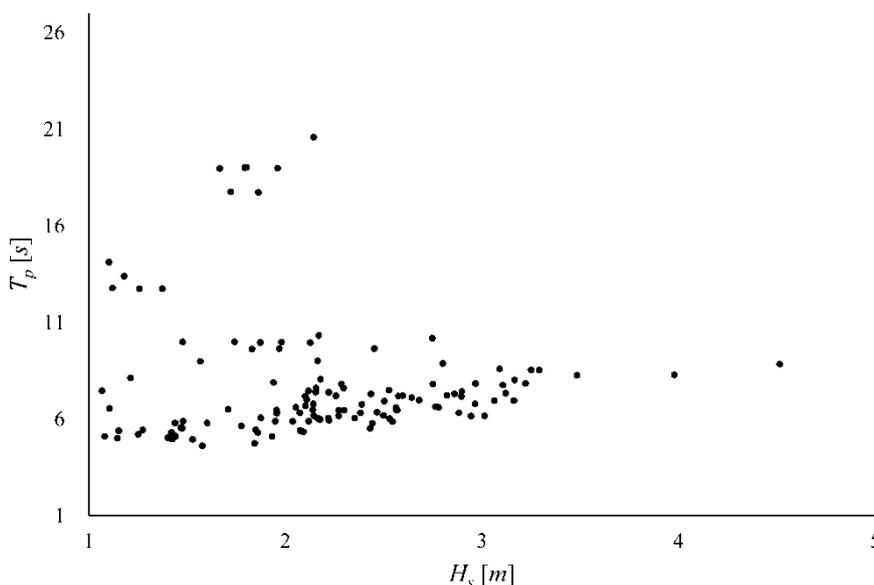


Figura 18. Distribuzione di altezze significative (H_s) e periodi di picco (T_p) associate ai 126 stati di mare rappresentativi del clima ondoso della località di installazione del prototipo di U-OWC presso il porto di Civitavecchia, Roma.

5.4 Calibrazione del valore ottimale di N_{ref} basata sullo stato di mare

Questa sezione descrive la strategia di controllo che associa un valore costante di N_{ref} per la durata dello stato di mare, definita sulla base delle caratteristiche spettrali del campo di onde incidente. Alla base di questa applicazione vi è il concetto secondo cui l'aerodinamica della turbina ha l'effetto di alterare le condizioni dinamiche all'interno della camera pneumatica. Di conseguenza, un controllo che agisce sulla velocità rotazionale della turbina può avere un ruolo fondamentale sull'ottimizzazione delle prestazioni dell'U-OWC, il quale potrà essere spinto a lavorare in condizioni di massima produzione, per diverse caratteristiche della sollecitazione. Nello specifico, l'impianto sarà forzato a riprodurre le condizioni di funzionamento ottimale tramite l'implementazione dell'algoritmo MPPT (Maximum Power Point Tracking). L'applicazione di questo metodo richiede la conoscenza dei punti di ottimo dell'impianto. Tali punto sono detti MPPs (Maximum Power Points) e sono individuati sulle curve di potenza tracciate per l'impianto e individuano il valore di N che restituisce la massima potenza convertita, per fissato stato di mare. Queste sono ottenute per mezzo di simulazioni numeriche, tracciando gli output di potenza media prodotta \bar{P}_g calcolati supponendo che la turbina operi ad un fissato valore N , supposto costante per tutta la durata della simulazione. Ogni curva è associata ad una coppia H_s-T_p (cft. sezione 5.4), ed è tracciata per punti al variare della quantità N . Ogni curva di potenza avrà una caratteristica forma a campana, il cui picco identifica il punto MPP che restituisce il valore di velocità della turbina da associare a ciascuno stato di mare. Le curve di potenza ottenute per ciascuna coppia H_s-T_p sono illustrate in figura 19, insieme ai MPPs relativi a ciascuno stato di mare.

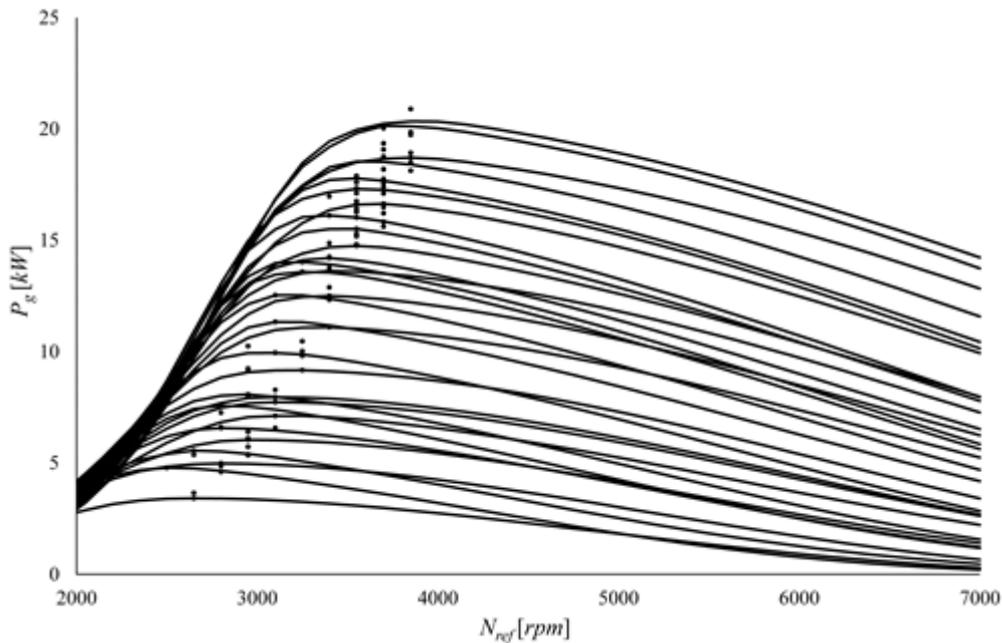


Figura 19. Potenza media convertita dal generatore per diversi valori di Nref. Ciascuna curva è associata ad un singolo stato di mare, le cui caratteristiche sono fornite dalla distribuzione riportata in figura 4. I punti indicano i punti di funzionamento ottimale dell’impianto (MPPs), di pertinenza a ciascuno stato di mare

A questo punto, resta da definire il parametro di riferimento che servirà da input per l’implementazione dell’algoritmo MPPT. Si propongono due approcci: il primo cerca il legame empirico tra la velocità ottimizzata per la turbina e l’altezza significativa dello stato di mare incidente; il secondo include nella formulazione anche il periodo di picco dello spettro. A tal fine, i valori di N_{ref} associati ai punti di massimo funzionamento vengono rappresentati in funzione alle rispettive H_s , ottenendo la distribuzione di punti riportata in figura 20. Il metodo dei minimi quadratati restituisce la curva che meglio approssima tale distribuzione, fornendo la seguente legge di potenza ad un parametro:

$$N_{ref} = 2587.4 H_s^{0.3958} \quad (32)$$

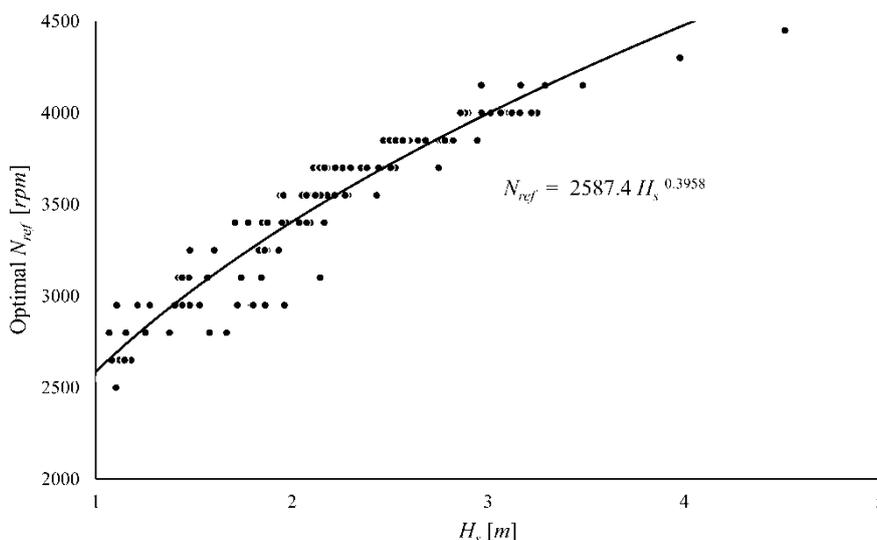


Figura 20. Legge di potenza che lega la velocità ottimale della turbina all’altezza significativa dello stato di mare incidente.

E' interessante osservare come la procedura descritta faccia riferimento a differenti stati di mare, ciascuno caratterizzato da una diversa forma e spettrale e, di conseguenza, diversi periodi di picco T_p . Tuttavia, l'eventualità di adottare questo parametro come unico di riferimento ai fini della deduzione della legge di controllo si dimostra inadeguata, a seguito della grande dispersione dei dati intorno ad alcuni valori di T_p . Questo comportamento è illustrato in figura 21.

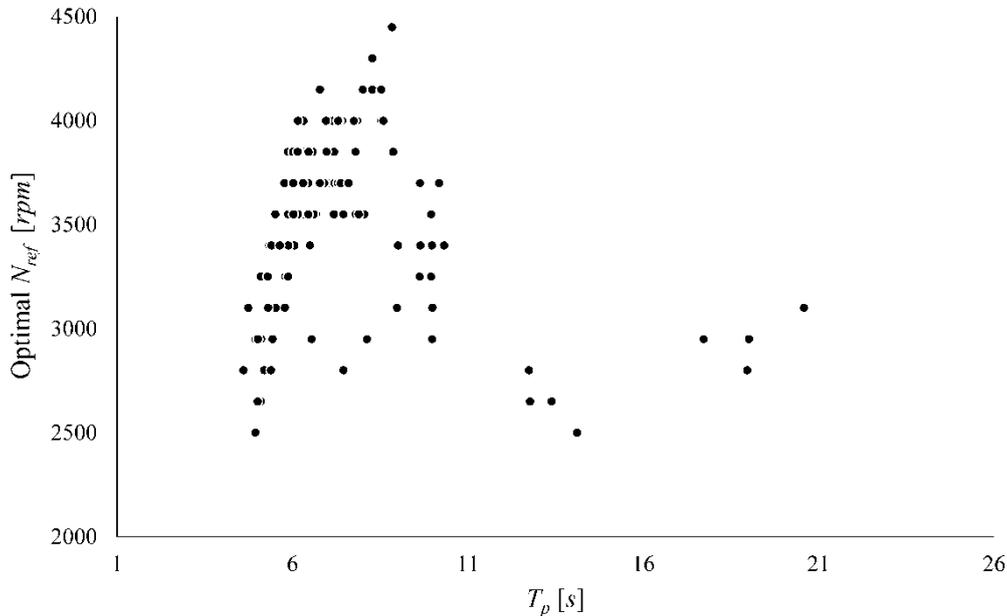


Figure 21. Valore ottimale della velocità rotazionale della turbina N_{ref} rispetto al periodo di picco T_p dello stato di mare di pertinenza.

La seconda formulazione proposta prevede l'inclusione, oltre che dell'altezza significativa, anche del periodo di picco dello stato di mare incidente. Di conseguenza, si ricercano i coefficienti K_1 , K_2 , e K_3 che definiscono la legge lineare a due parametri che esprime il legame tra la coppia H_s-T_p ed il valore ottimale N_{ref} :

$$N_{ref} = K_1 + K_2 H_s + K_3 T_p \quad (33)$$

Applicando un modello di regressione multipla, si ottiene:

$$K_1 = 2535.7$$

$$K_2 = 223.5 \quad (34)$$

$$K_3 = 3.012$$

La figura 22 mostra il confronto tra le diverse leggi di controllo presentate. Nello specifico, si osserva la capacità delle due eq. (32) e (33) a spingere il sistema a riprodurre le condizioni di ottimo, in corrispondenza ai diversi stati di mare che sollecitano l'impianto. Come si osserva, la legge che adotta come unico parametro di riferimento l'altezza significativa dello spettro dell'onda incidente è in grado di effettuare una corretta identificazione delle prestazioni ottimali del sistema. Infatti, l'algoritmo di controllo non risulta significativamente influenzato dall'inclusione del periodo di picco dello stato di mare come ulteriore parametro di riferimento.

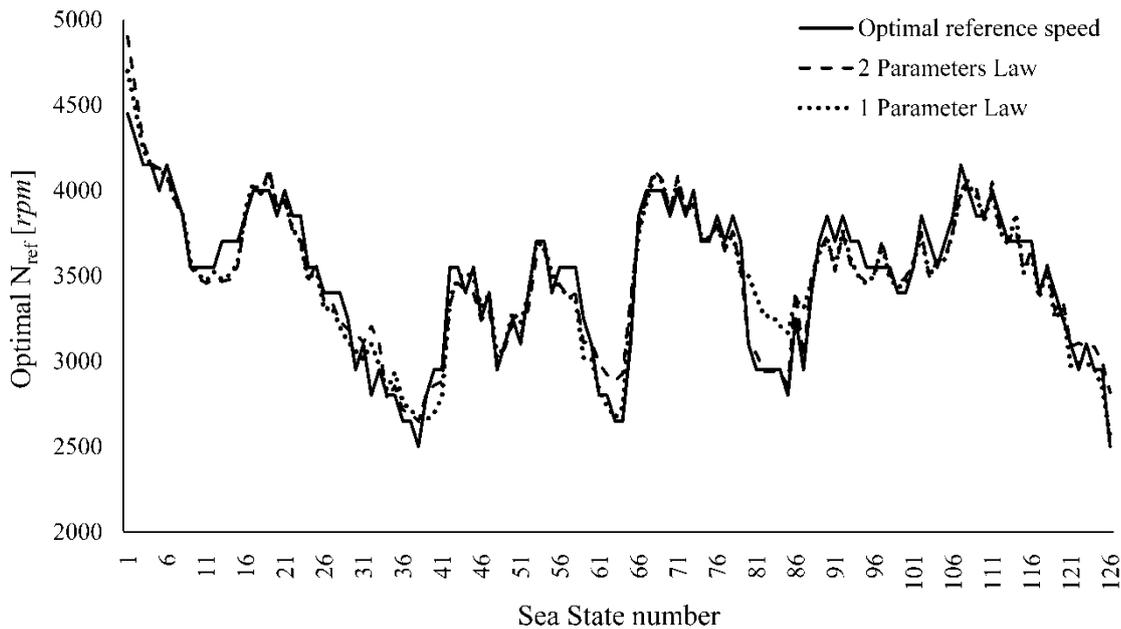


Figura 22. Confronto tra le prestazioni ottenute a seguito dell'implementazione della legge di controllo a uno (eq x) e due (eq x) parametri, rispetto al caso in cui la turbina opera direttamente alla velocità di rotazione ottimale, per ciascuno dei 126 stati di mare analizzati.

Al fine di verificare la validità della strategia descritta, si propone il confronto tra i risultati ottenuti da realizzazioni numeriche che riproducono il funzionamento realistico dell'algoritmo ed il caso ideale. Quest'ultimo è ottenuto supponendo che l'impianto operi direttamente alle condizioni di ottimo: qui, la strategia di controllo non giocherà alcun ruolo. Nonostante il caso ideale non rappresenti un caso realisticamente realizzabile, esso rappresenta il termine di paragone per misurare la capacità della legge di controllo implementata a spingere l'impianto a riprodurre le condizioni definite dagli MPPS. Le prestazioni ottenute per il caso ideale sono riportate in figura 23, dove si mostra l'energia media convertita dal generatore per ciascuno dei 126 stati di mare analizzati. L'energia totale convertita, lungo la durata dell'intera simulazione pari a 42 ore, è pari a 545.80 kWh.

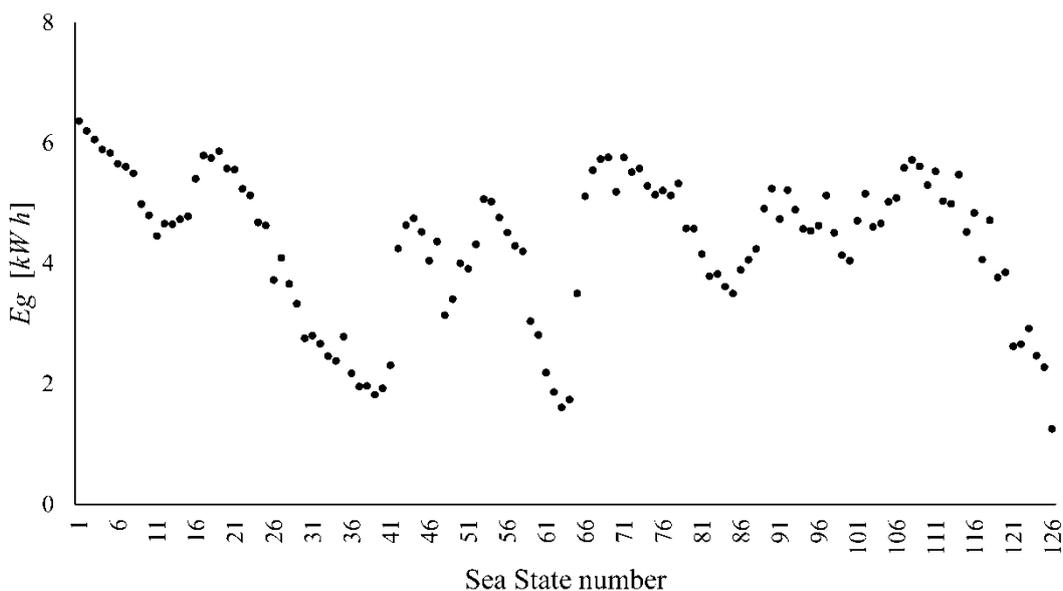


Figura 23. Energia media convertita dal generatore, nel caso in cui il sistema operi direttamente al corrispondente punto di massimo funzionamento (MPP) per fissato stato di mare.

L'implementazione realistica dell'algoritmo espresso dalla legge ad uno [eq (32)] o due [eq (33)] parametri è schematizzata in figura 24. Tale approccio assume la presenza di una adeguata strumentazione che misura il clima ondoso in campo indisturbato nelle vicinanze dell'impianto. In questo caso, si adotta una serie temporale simulata che assume il ruolo di misure ottenute in tempo reale presso la località di riferimento. In pratica, si considerano simulazioni della durata di 20 minuti che riproducono la successione di stati di mare riprodotta in figura 18. Con riferimento allo schema di figura 24, questo processo è chiamato $\eta(t)$. Definito l'input, si riproduce il funzionamento dell'algoritmo di controllo in condizioni realistiche: a partire dalle misure $\eta(t)$ relative ad una durata di 10 min, si calcolano le coppie H_s-T_p che identificano lo stato di mare incidente. In figura, i dati misurati per una durata di 10 min sono chiamati $\eta(t-\tau)$, essendo la quantità $t-\tau$ rappresentativa dell'istante di misurazione iniziale. A questo punto si stima la velocità N_{ref} in funzione di H_s o della coppia H_s-T_p (eq. (32) o eq. (33)). Il valore N_{ref} ottenuto è inserito nell'eq. (30), che indica al generatore il momento torcente da applicare per riportare l'impianto al funzionamento ottimale.

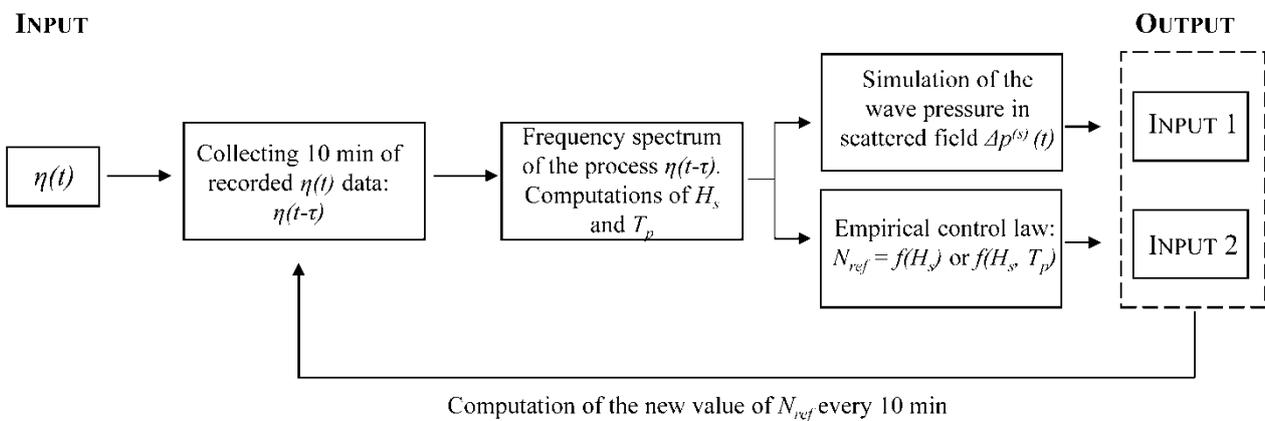


Figura 24. Diagramma a blocchi che illustra il funzionamento in tempo reale della strategia di controllo che lega il valore ottimale Nref al contenuto energetico dello stato di mare, per mezzo della legge a 1 (eq. 32) o 2 (eq. 33) parametri. I blocchi all'interno della linea tratteggiata riconducono il calcolo allo schema illustrato in figura 2.

Le prestazioni ottenute tramite l'implementazione di questa strategia di controllo sono riassunte in tabella 2. Il confronto con il caso ideale descritto precedentemente mostra una differenza del 15% in termini di energia media prodotta dal generatore, per la durata totale della simulazione.

Tabella 3. Prestazioni dell'algoritmo MPPT quando: a) si implementa la legge a 1 parametro (eq 32), b) si implementa la legge a 2 parametri. La strategia di controllo è applicata su una simulazione della durata di 42 ore. Nref indica la velocità rotazionale di riferimento della turbine, N la velocità rotazionale istantanea, Pg la potenza istantanea prodotta dal generatore, Eg l'energia elettrica convertita dal generatore. Il calcolo è riferito ad una singola cella.

	$\langle N_{ref} \rangle$ [rpm]	$\langle N \rangle$ [rpm]	$\langle P_g \rangle$ [kW]	$\langle E_g \rangle$ [kWh]
a)	3040.17	3535.20	11.13	467.45
b)	3040.79	3535.57	11.15	468.30

5.5 Calibrazione del valore ottimale di N_{ref} basata sulla dinamica istantanea della camera pneumatica

In questa sezione si deriva la strategia di controllo basata sulla dinamica attuale del dispositivo. Secondo questo approccio, la velocità della turbina che ottimizza le prestazioni dell'impianto è calibrata in tempo reale, a partire dalle misure fornite da trasduttori di pressione e sonde ultrasoniche opportunamente disposte all'interno della camera pneumatica dell'U-OWC. Alla base di questa strategia di controllo vi sono considerazioni riguardanti il funzionamento meccanico delle turbine di tipo Wells. Nello specifico, è noto che queste turbine sono soggette a condizioni di stallo per valori elevati del coefficiente di flusso adimensionalizzato U^* [17]. Questo aspetto è mostrato nelle curve di efficienza ottenute per le turbine

Wells da Curran e Gato. L'eq. (24) mette in evidenza come le prestazioni della turbina risultino fortemente influenzate dal valore istantaneo della velocità del flusso di aria u_a , che è peraltro caratterizzato da variazioni significative nell'arco di un ciclo d'onda. Di conseguenza, la derivazione analitica delle condizioni di ottimo per il coefficiente U^* in funzione della dinamica istantanea all'interno della camera pneumatica è assunta come algoritmo di controllo: tale implementazione ha l'obiettivo di portare il funzionamento dell'impianto a lavorare lontano dalla condizione di stallo. Con riferimento alle equazioni (7), (10) e (24), la velocità del flusso di aria u_a è rappresentata in funzione della variazione temporale della massa d'aria dM_a/dt :

$$U_{opt}^* = -\frac{1}{N_{opt}} \frac{1}{D/2} \frac{2}{A} \frac{1}{\rho_{atm} + \rho_c} \frac{dM_a}{dt} \quad (35)$$

La massa d'aria M_a si ottiene dall'eq. (7):

$$M_a = b_3 b_2 \rho_c (h_c + x) \quad (36)$$

Includendo la legge politropica [eq (8)] per la variazione della densità dell'aria nella camera, il termine dM_a/dt diventa:

$$\frac{dM_a}{dt} = b_3 b_2 \rho_{atm} \left(\frac{p_c}{p_{atm}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \frac{dx}{dt} + b_3 b_2 (h_c + x) \frac{\rho_{atm}}{p_{atm}^{1/k}} \frac{1}{k} p_c^{\frac{1}{k}-1} \quad (37)$$

Combinando le eq. (37) e (35), la velocità rotazionale ottimale è ottenuta come funzione del valore istantaneo del livello idrico dell'acqua x e del valore istantaneo della pressione dinamica della camera p_c , chiamata $G(x, p_c)$:

$$N_{opt} = -\frac{4G(p_c, x)}{ADU_{opt}^*} \quad (38)$$

Nell'eq. (38), si assume il valore di 0.1 per il coefficiente U^* che corrisponde al picco di efficienza per le turbine di tipo Wells[17].

INPUT

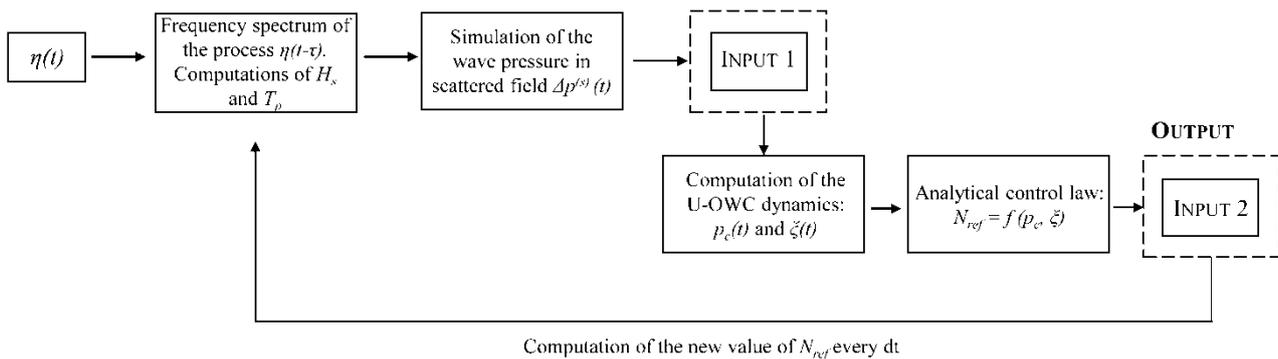


Figure 25. Diagramma a blocchi che illustra il funzionamento in tempo reale della strategia di controllo che lega il valore ottimale N_{ref} alle risposta dinamica istantanea della camera pneumatica, per mezzo della legge ricavata analiticamente (eq 38). I blocchi all'interno della linea tratteggiata riconducono il calcolo allo schema illustrato in figura 16.

Tabella 4. Prestazioni dell'impianto ottenute a seguito dell'implementazione della strategia di controllo basata sulla dinamica istantanea della camera pneumatica. Il calcolo fa riferimento ad una simulazione della durata di 42 ore. N la velocità rotazionale istantanea, P_g la potenza istantanea prodotta dal generatore, E_g l'energia elettrica convertita dal generatore. Il calcolo è riferito ad una singola cella.

$\langle N_{ref} \rangle$ [rpm]	$\langle N \rangle$ [rpm]	$\langle P_g \rangle$ [kW]	$\langle E_g \rangle$ [kWh]
3073.56	3954.64	9.54	400.68

5.6 Effetto della strategia di controllo sulla dinamica dell'U-OWC

In questa sezione si osserva come il meccanismo di funzionamento dell'impianto si modifica quando questo è forzato ad operare in condizioni di funzionamento ottimale. A tal fine, si analizza l'effetto del funzionamento della turbina sulla distribuzione della fase della risposta dinamica del sistema, valutata rispetto la fase della sollecitazione. Tale analisi è condotta sia nel dominio del tempo che nel dominio della frequenza. Nel primo caso si calcola l'indice di risonanza valutato tra la sollecitazione $\Delta p^{(s)}$ e il processo di oscillazione dell'acqua x . Definito T^* lo sfasamento temporale del primo minimo della funzione di cross-correlazione definita come:

$$\Psi(T) = \langle \Delta p^{(s)}(t) \cdot x(t+T) \rangle \tag{39}$$

l'indice di risonanza R sarà dato da:

$$R = \frac{4 \cdot T^*}{T_p} \tag{40}$$

Secondo questa definizione, R assume il valore unitario in condizioni di risonanza

Le analisi nel dominio della frequenza sono effettuate tramite il confronto tra lo spettro della sollecitazione $S_{\Delta p^{(s)}}(\omega)$ e lo spettro ottenuto dal processo ottenuto dalle oscillazioni della colonna d'acqua, $S_{x(t)}(\omega)$. In questo contesto, le condizioni di risonanza sono raggiunte quando i picchi dei due spettri sono vicini tra loro.

Tale analisi è effettuata considerando i tre stati di mare descritti in tabella 5. Nello specifico, il primo è caratterizzato da un periodo di picco T_p coincidente con il periodo naturale di oscillazione della colonna d'acqua: tale parametro è quello utilizzato in fase di dimensionamento dell'impianto. I restanti stati di mare sono rappresentativi di condizioni che portano il sistema a lavorare lontano dalle condizioni di risonanza. La forma spettrale ad essi associata è tipica di onde di vento ed onde di mare lungo per il caso 1 e 2, rispettivamente. Nelle analisi si considerano tre diversi valori associati alla velocità di rotazione della turbina, considerata costante durante la simulazione: 3000, 2000 e 1000 rpm. Con riferimento a questo, il valore $N = 3000$ rpm è quello che corrisponde alla situazione di funzionamento ottimale, come mostrato dai MPPs riportati nelle curve di potenza di figura 5.

Tabella 5. Parametri spettrali degli stati di mare utilizzati per analizzare l'effetto della velocità di rotazione della turbina sulla dinamica del Sistema. H_s e T_p indicano l'altezza significativa e il periodo di picco, rispettivamente.

Sea State	H_s [m]	T_p [s]
1	2.47	6.35
2	1.58	4.6
3	2.14	20.58

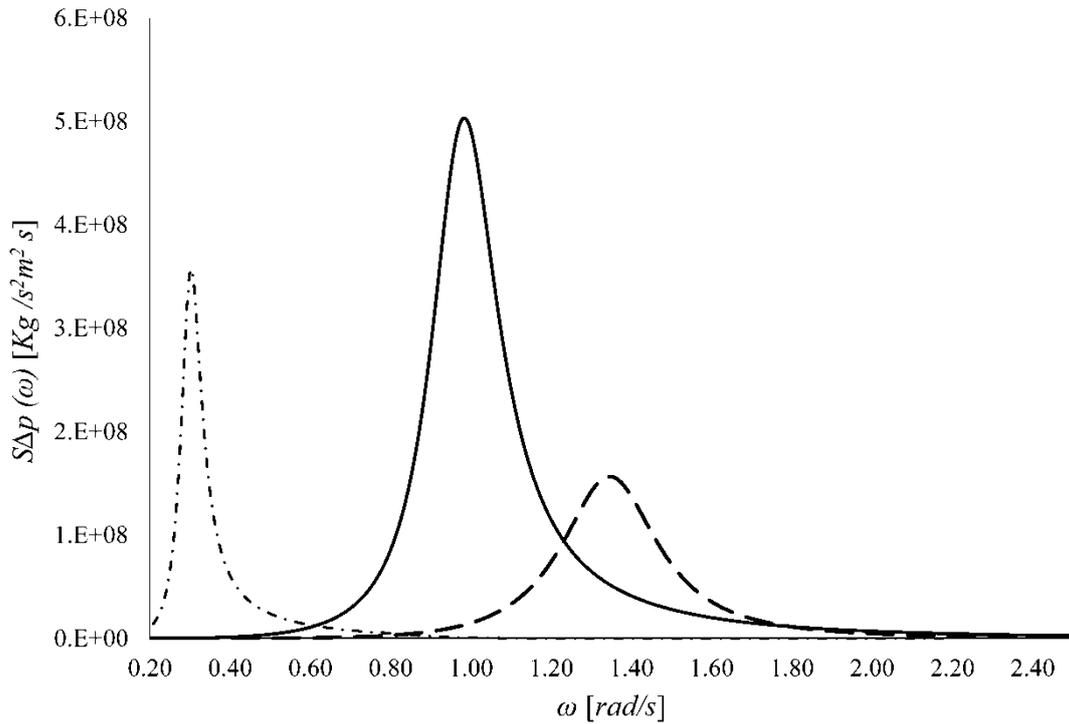


Figura 26. Spettri di frequenza associati agli stati di mare descritti in tabella x. La linea continua, tratteggiata e la punto-tratto sono riferite, rispettivamente, agli stati di mare 1, 2 e 3.

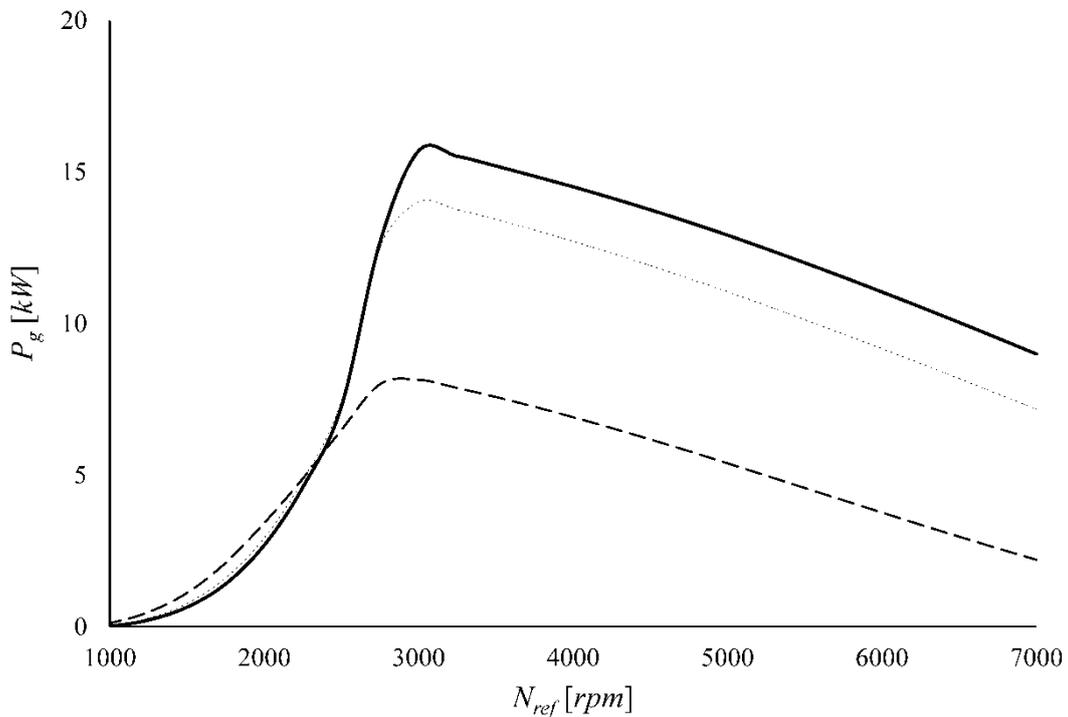


Figura 27. Curve di potenza del sistema per i tre stati di mare descritti in tabella x. La linea continua, tratteggiata e la punto-tratto indicano, rispettivamente, gli stati di mare 1, 2 e 3.

I risultati di tale analisi sono riportati in tabella 6. Si osserva che la distribuzione del processo p_c è fortemente influenzata dalla velocità di rotazione della turbina. Infatti, la deviazione standard del processo p_c è una funzione crescente, al crescere di N_{ref} . Inoltre, le simulazioni condotte nel dominio del tempo mostrano che l'indice di risonanza R è una funzione decrescente per valori crescenti di N_{ref} . Inoltre, i risultati mostrano come la forma dello spettro incidente influenzi la risposta dinamica dell'impianto: trend

diversi sono osservati nel caso di stato di mare caratterizzato dallo spettro di onde di vento e di onde di mare lungo. Infatti, se valori crescenti dell'indice di risonanza R implicano l'allontanamento dalla condizione di risonanza nel primo caso, al contrario lo stesso trend indicherà il raggiungimento di tale condizione nel caso di onde di mare lungo.

Tabella 6. Risposta nel dominio del tempo e della frequenza dell'U-OWC. N_{ref} è la velocità rotazionale di riferimento della turbina, $Std[p_c(t)]$ è la deviazione standard del processo associato alla pressione dell'aria nella camera pneumatica, R è l'indice di risonanza, $\omega_p[S_x]$ e $T_p[S_x]$ sono, rispettivamente, la frequenza di picco e il periodo di picco associati alle oscillazioni della colonna d'acqua.

	Stato di mare 1			Stato di mare 2			Stato di mare 3		
N_{ref} [rpm]	3000	2000	1000	3000	2000	1000	3000	2000	1000
$Std[p_c(t)]$	11791	8555	6520	7117	5634	4107	5053	4146	2897
R	1.01	1.13	1.26	1.39	1.56	1.82	0.330	0.350	0.408
$\omega_p[S_x]$	1.00	0.97	0.95	1.01	0.98	0.92	0.98	0.99	1.02
$T_p[S_x]$	6.30	6.50	6.61	6.21	6.40	6.83	6.41	6.35	6.16

Lo stesso comportamento si ottiene dalle analisi condotte nel dominio della frequenza. Infatti, nel caso di spettri caratteristici di onde di vento, la riduzione del valore N_{ref} ha come effetto quello di allontanare i picchi degli spettri $S_{\Delta p(s)}(\omega)$ e $S_{x(t)}(\omega)$. Al contrario, per spettri tipici di onde di mare lungo, nelle stesse condizioni tali spettri tenderanno ad avvicinarsi tra loro.

Osservando queste analisi dalla prospettiva delle strategie di controllo, si può affermare che, nel caso di spettri tipici di onde di vento, a valori crescenti di N_{ref} si associano valori crescenti di potenza media prodotta dall'impianto, indipendentemente dalla vicinanza alle condizioni di risonanza. Al contrario, nel caso di spettri tipici di onde di mare lungo, la condizione di risonanza e la massimizzazione delle prestazioni dell'impianto non avvengono contemporaneamente.

6 Monitoraggio dell'impianto REWEC3 di Civitavecchia

6.1 Apparato strumentale

E' stata effettuata una prima sperimentazione sul REWEC3 (U-OWC) di Civitavecchia per la produzione di energia elettrica nell'ambito del progetto "Study for the development of the green mobility in the port of Civitavecchia through the implementation of the pilot technology REWEC 3", presentato dall'Autorità Portuale di Civitavecchia, che ha visto la partecipazione anche di WAVENERGY.IT e dell'Università Mediterranea. Il progetto è stato finanziato dall'Unione Europea, nell'ambito del Trans-European Transport Network TEN-T, codice progetto: 2013-IT-92050-S (26075671).

Lo scopo del progetto è di testare soluzioni innovative all'interno del porto di Civitavecchia al fine di renderlo "green" sul fronte della mobilità interna. In questo caso, il progetto era baricentrato sui bisogni di mobilità interna del porto. Tuttavia, è da evidenziare che il progetto prevede l'implementazione di due importanti attività:

- i) il monitoraggio di due celle attive adiacenti (in Figura 28 è evidenziato il cassone in cui è installata la strumentazione che definisce il sistema di monitoraggio attualmente operativo);
- ii) l'installazione di una turbina di Wells tradizionale, della potenza di 20kW, per la produzione di energia elettrica dal moto ondoso (in Figura 29 sono riportate le sequenze di installazione).

Il monitoraggio prevede l'impiego della seguente strumentazione. Trasduttori di pressione, aventi lo scopo di fornire delle misurazioni di pressione in ben definiti punti dell'impianto. Le misure di pressione sono effettuate sia sotto-battente, cioè al di sotto del livello idrico, che nella camera d'aria. Inoltre, si prevede il loro utilizzo sia nel condotto esterno che nella colonna d'acqua oscillante interna.

Il sistema di monitoraggio si compone, in totale, di 18 strumenti la cui disposizione è illustrata in Figura 30. In dettaglio, si hanno:

- 4 trasduttori in cima al condotto verticale che collega la colonna d'acqua oscillante con il campo di moto esterno (sono indicati con i numeri 1,2 7,8 identificativi delle due coppie posizionate all'imboccatura di due celle adiacenti);
- 10 trasduttori posizionati all'interno di due camere pneumatiche adiacenti per la misura delle pressioni all'interno della colonna d'acqua oscillante; nello specifico, gli strumenti posti all'interno delle due camere sono identificati con i numeri 3,4,5,6 – 9,10,11,12,13,14);
- 2 trasduttori in cima alle camere d'aria, identificati con i numeri 17,18 – 15,16;

I trasduttori nella colonna oscillante sia sotto battente che all'interno della camera d'aria consentono di determinare la cinematica del fluido all'interno dell'impianto, da cui è possibile determinare la potenza assorbita dall'impianto; e consentono di determinare i livelli dell'acqua all'interno della camera di assorbimento. I trasduttori posti all'imboccatura del REWEC3 forniranno misure per la stima delle azioni incidenti.

La strumentazione è attualmente installata in situ. Alcune immagini sulla fase di installazione di tutti i sensori sono riportate in Figura 31, operativa da Novembre 2015.

Tutti i sensori di misura sono poi collegati ad una stazione di acquisizione. Tale stazione funge da collettore di tutte le misure ottenute in situ, ed ha il compito di inviare le informazioni acquisite ai server ospitanti le componenti software dedicate alla elaborazione dei dati.



Figura 28. Vista del cassone in cui due celle adiacenti sono attualmente strumentate per il monitoraggio. Nella cella più a Nord confinate con il cassone III è posizionata la turbina, in quella adiacente è operativa la strumentazione con sfiato da 0.45m.



Figura 29. Fasi di installazione della turbina di Wells.

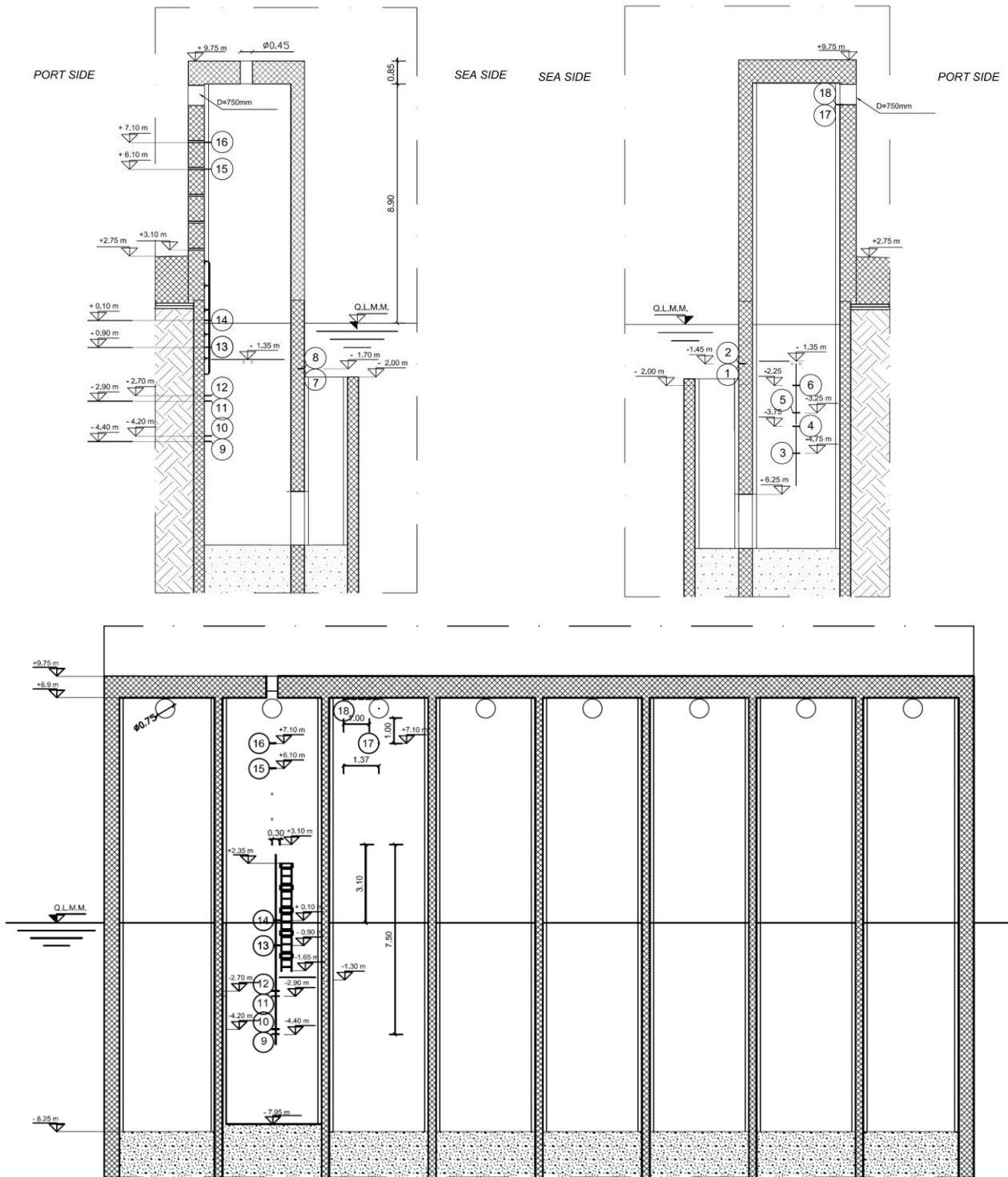


Figura 30. Schema della dislocazione degli strumenti all'interno delle celle attive del cassone IV (vedi layout di Figura 13).

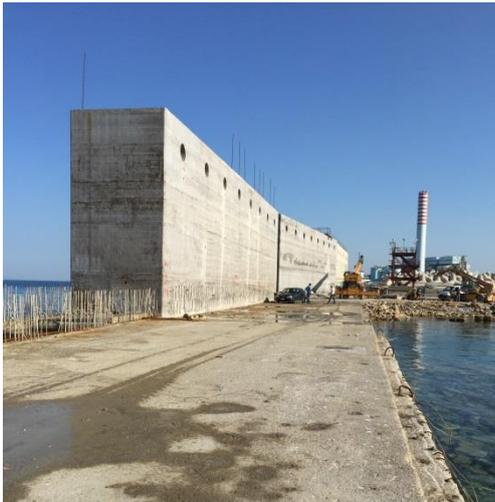


Figure 31. Alcune immagini durante la fase di installazione dei trasduttori nelle celle di assorbimento.



Figura 32. Sistema di acquisizione operativo a Civitavecchia: due celle attive monitorate mediante sensori di misura su due celle adiacenti, una con turbina e una con sfiato, e collegate ad una stazione di acquisizione dati.

6.2 Osservazione dell'impianto e comportamento dell'impianto REWEC3 di Civitavecchia

L'idrodinamica di un impianto REWEC3 a celle indipendenti è stata ricavata da Boccotti [1-4, 21] tramite una equazione differenziale non-lineare accoppiata all'equazione di stato relativa al comportamento della camera d'aria. L'equazione del moto della colonna d'acqua all'interno della camera pneumatica è descritta, mediante l'approccio di Boccotti tramite l'Eq. (3), che rappresenta il teorema di Bernoulli generalizzato.

La forzante del modello è la storia temporale delle onde del carico di pressione all'imboccatura superiore del condotto verticale del REWEC3. La risposta del modello consente di determinare i valori delle grandezze cinematiche, dei livelli dell'acqua e della pressione dell'aria all'interno della camera di assorbimento.

Per quanto concerne i livelli dell'acqua all'interno della camera pneumatica, questi sono riferiti alla quota della copertura e sono stati determinati direttamente dalle misure delle pressioni all'interno della camera sia sotto battente (trasduttori di pressione n. 3,4,5,6 e 9,10,11,12) che all'interno del polmone d'aria (trasduttori di pressione n. 15,16,17) [4]. In dettaglio, considerando all'interno della colonna d'acqua della camera pneumatica una coppia di trasduttori di pressione posizionati ad una distanza relativa Δz , tali che le pressioni siano p_l e p_u e disponendo di un trasduttore di pressione per la misura della pressione dell'aria, p_c , l'accelerazione della colonna d'acqua può essere calcolata come segue

$$a = \frac{p_l - p_u}{\rho \Delta z} - g \quad (41)$$

essendo ρ la densità dell'acqua e g l'accelerazione di gravità.

Il livello dell'acqua all'interno della camera può, quindi, essere valutato mediante la relazione

$$\xi = \xi_l - \frac{p_l - p_c}{\rho(g + a)} \quad (42)$$

in cui ξ_l è la distanza verticale tra la quota dello strumento installato alla profondità maggiore all'interno della camera e la quota della copertura, secondo lo schema riportato in Figura 33.

Per quanto riguarda le performance dell'impianto, queste possono essere stimate innanzitutto considerando il Coefficiente di Assorbimento (C_a) definito come il rapporto tra potenza media assorbita dall'impianto durante lo stato di mare e la potenza media incidente. Per quanto concerne la stima della potenza media assorbita questa è stata stimata mediante la procedura proposta da Boccotti, *et al.* [4], che è legata al calcolo delle caratteristiche cinematiche della colonna d'acqua all'interno della camera di assorbimento. La determinazione di tali grandezze è stata effettuata mediante le misure dei trasduttori posti all'interno e all'esterno delle camere pneumatiche.

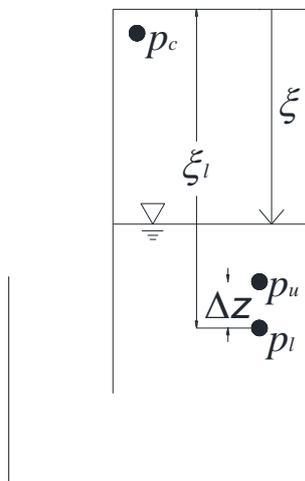


Figura 33. Schema per il calcolo del livello della colonna d'acqua all'interno della camera del REWEC3.

Le misure delle grandezze all'interno delle camere sono di fondamentale importanza per la determinazione del comportamento dell'impianto e per l'ottimizzazione delle performance energetiche dello stesso. Le procedure per la massimizzazione dei rendimenti energetici dell'impianto REWEC3 di Civitavecchia sono legate all'implementazione del più efficace algoritmo di controllo, da accoppiare alle componenti elettromeccaniche più affidabili ed efficienti.

Come prima fase si sono considerate le stime energetiche in termini di assorbimenti dell'energia ondata incidente per stati di mare con altezze significative comprese nel range di 2.5 – 3.5m (misurate alla profondità di circa 40m di fronte alla testata del molo di sovraflutto del porto di Civitavecchia). Il range è di interesse per l'impianto di Civitavecchia, in quanto, gli stati di mare considerati rappresentano le condizioni ondose che convogliano la maggiore quantità di energia durante l'anno per l'impianto.

In Figura 34, 35 e 36, sono riportate le storie temporali delle pressioni dell'aria (TR. 16) e dei livelli dell'acqua all'interno della camera pneumatica (TR. 7,9,10,11,12) per tre opportuni stati di mare nel range delle altezze significative precedentemente definito. Per ciascun record è stato calcolato l'andamento dei livelli dell'acqua all'interno della camera, ovvero l'andamento della coordinata ξ calcolata rispetto al sistema di riferimento con origine sulla copertura della camera.

Con la procedura proposta da Boccotti, *et al.* [4] sono stati, infine, stimati i coefficienti di assorbimento per gli stati di mare analizzati. Questi variano tra 0.65 e 0.85, in linea con i primi risultati sulle performance energetiche ottenuti sul REWEC3 di Civitavecchia [22].

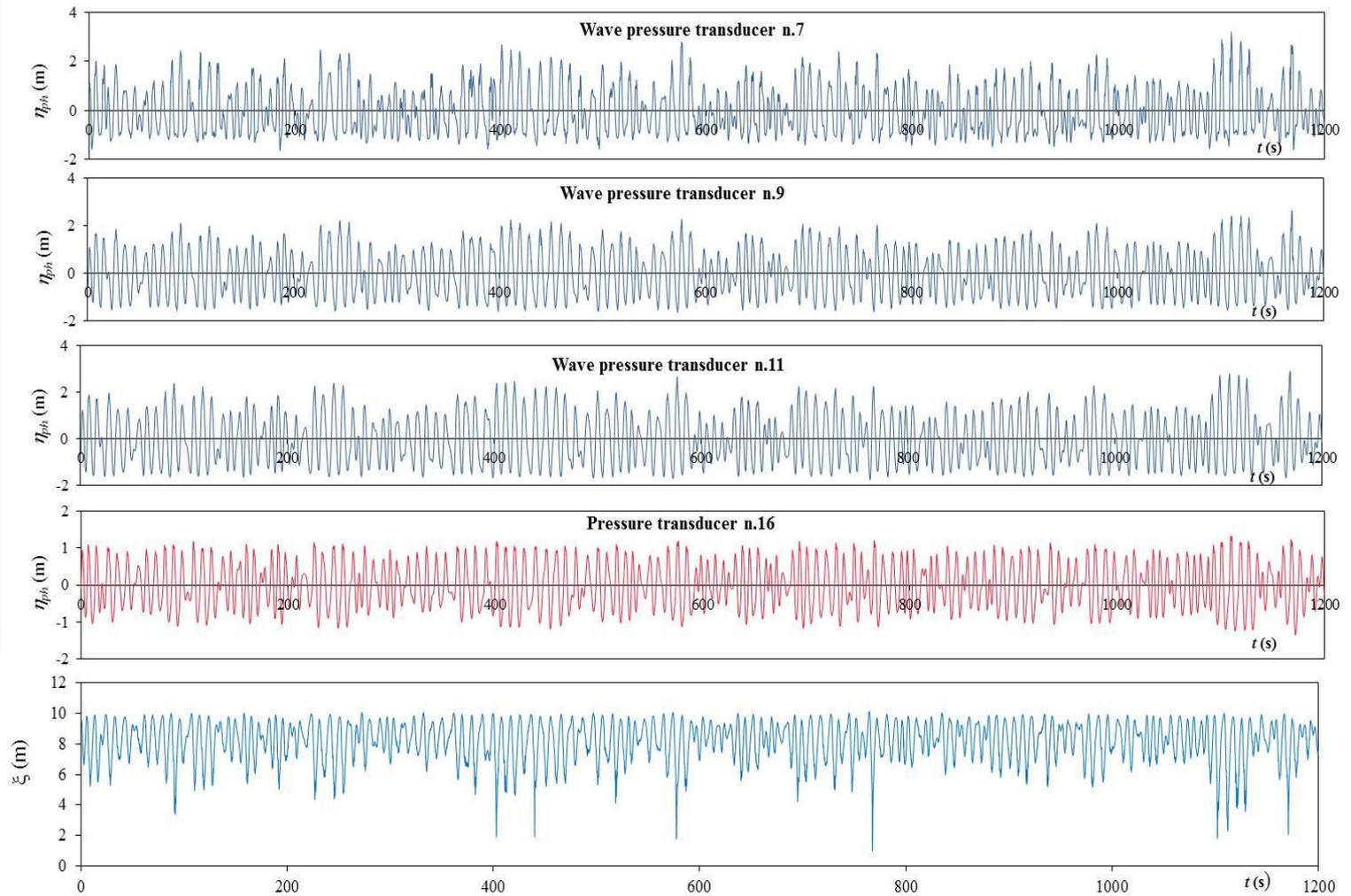
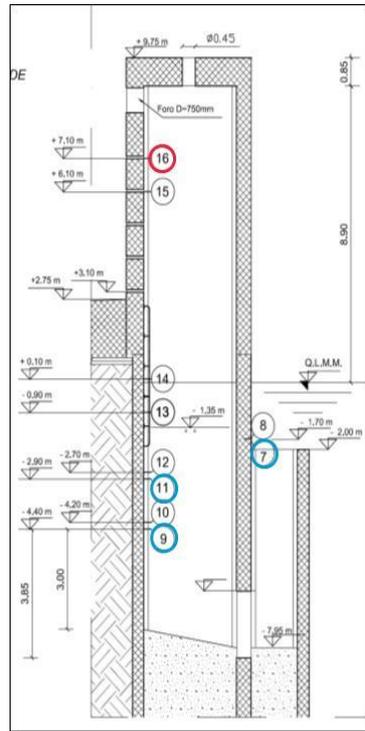


Figura 34. Record 1: andamento delle fluttuazioni delle pressioni all'interno della massa d'acqua (TR. 7-9-11) e dell'aria (TR.16), livello dell'acqua ξ all'interno della camera con origine del sistema di riferimento sulla copertura della camera stessa.

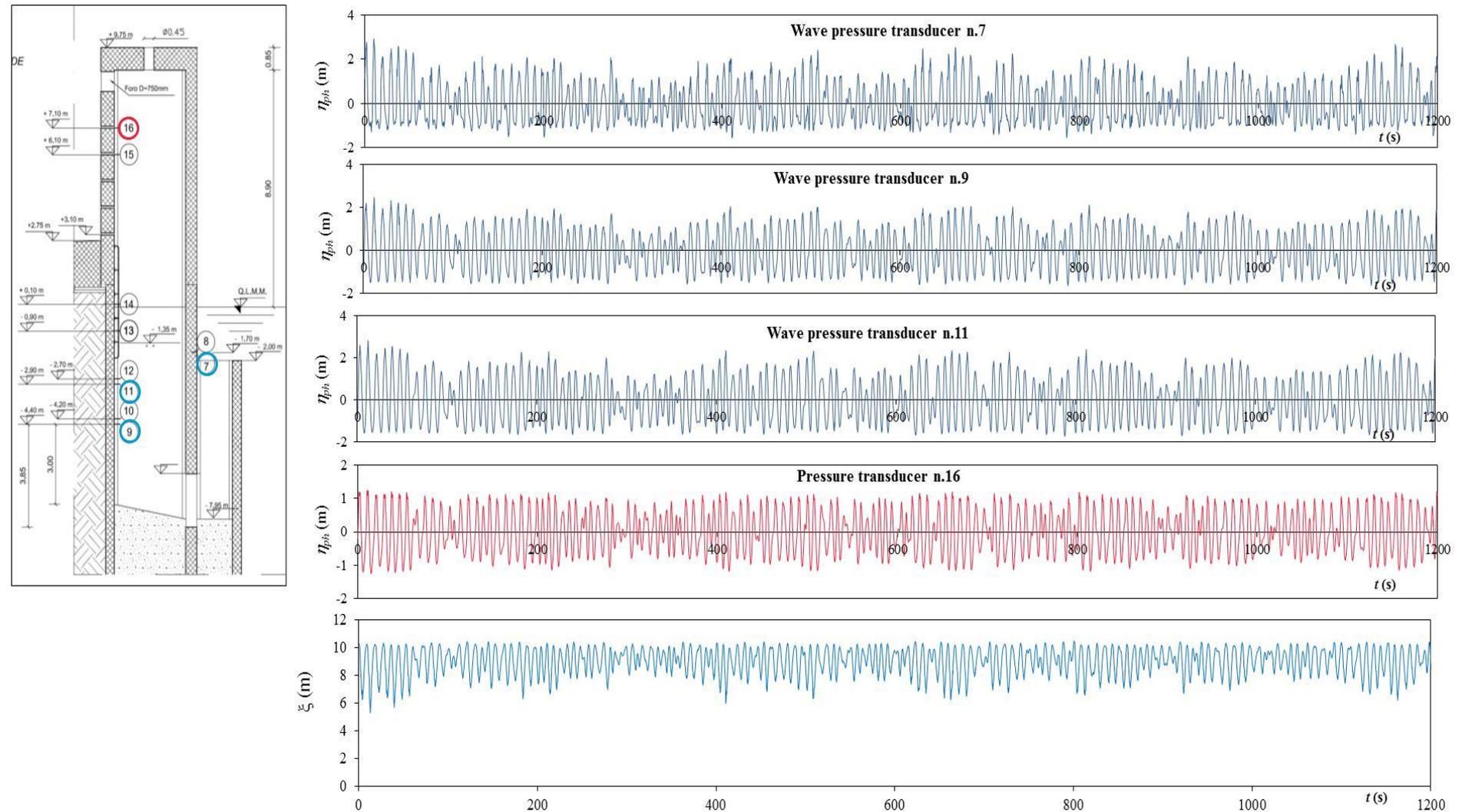


Figura 35. Record 2: andamento delle fluttuazioni delle pressioni all'interno della massa d'acqua (TR. 7-9-11) e dell'aria (TR.16), livello dell'acqua ξ all'interno della camera con origine del sistema di riferimento sulla copertura della camera stessa.

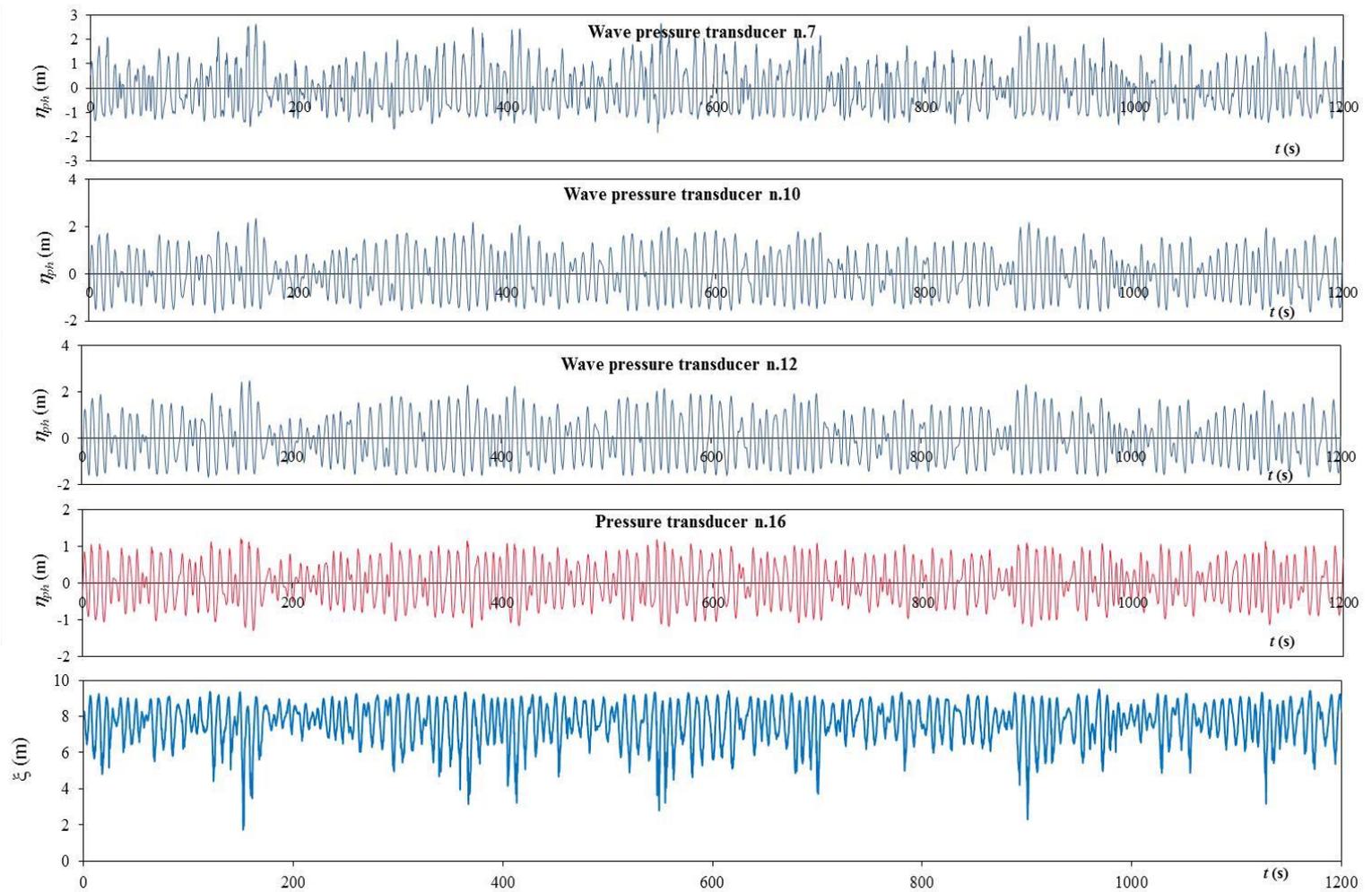
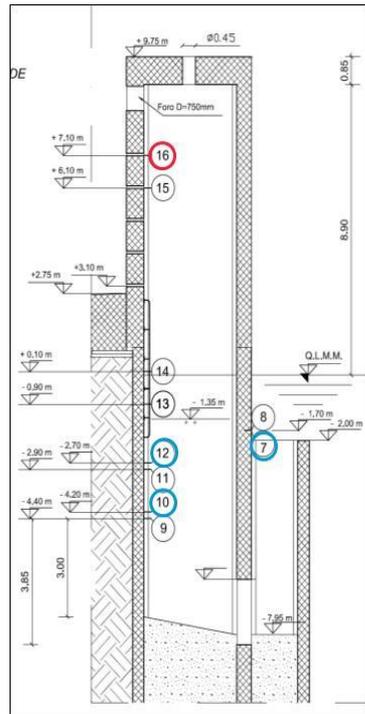


Figura 36. Record 3: andamento delle fluttuazioni delle pressioni all'interno della massa d'acqua (TR. 7-10-12) e dell'aria (TR.16), livello dell'acqua all'interno della camera con origine del sistema di riferimento sulla copertura della camera stessa.

7 Conclusioni

Il report ha fornito una descrizione del lavoro svolto nell'ambito del progetto "Monitoraggio e sviluppo di algoritmi per l'ottimizzazione dell'energia prodotta da un OWC in scala 1:1". Il progetto è sviluppato intorno all'impianto REWEC3 in scala di prototipo costruito presso il porto di Civitavecchia. Nella prima parte del report si sono descritte le caratteristiche meteo-climatiche del paraggio in esame. Una trasposizione del moto ondoso sottocosta è stata condotta tramite modellazione numerica a partire da dati di moto ondoso di largo. Inoltre, aspetti modellistici sono discussi considerando gli approcci analitici disponibili in letteratura.

Le caratteristiche del prototipo sono descritte inquadrando il progetto nell'ambito delle attività di ampliamento dell'infrastruttura portuale. Successivamente, i dati dell'impianto e le tecniche sviluppate in letteratura sono impiegati ai fini di sviluppare due differenti strategie di controllo: la prima è costituita da una formulazione di derivazione empirica che lega la velocità di rotazione ottimale della turbina al contenuto energetico dello stato di mare incidente. In questo contesto, si assume una velocità di riferimento costante, lungo tutta la durata dello stato di mare. L'algoritmo prevede l'implementazione del metodo MPPT (Maximum Power Point Method) per spingere l'impianto a riprodurre le condizioni di funzionamento ottimale, in corrispondenza a diverse condizioni ondose. L'applicazione della strategia di controllo utilizza come dato di input le informazioni spettrali dello stato di mare incidente. Nello specifico, si dimostra come l'altezza significativa possa essere utilizzata come unico parametro di input necessario ai fini dell'implementazione dell'MPPT. La seconda soluzione è basata su una formulazione analitica che lega il funzionamento ottimale della turbina alla dinamica istantanea della camera pneumatica. I risultati mostrano come la prima strategia di controllo permette di raggiungere prestazioni superiori, rispetto al caso in cui la velocità di riferimento è continuamente calibrata sulla base della dinamica istantanea misurata nella camera pneumatica. Infine, si osserva l'effetto della velocità della turbina sulla distribuzione della fase della risposta dinamica dell'U-OWC, rispetto la fase della distribuzione della sollecitazione. A tal fine, si effettuano analisi nel dominio del tempo e della frequenza, considerando stati di mare caratterizzati da varie forme spettrali. I risultati mostrano come nel caso di stati di mare descritti da spettri di onde di vento, il sistema si avvicini alle condizioni di risonanza quando la turbina assume velocità prossime a quella ottimale. Al contrario, nel caso di spettri tipici di onde di mare lungo, valori crescenti della velocità di rotazione della turbina portano ad un aumento dell'output di potenza media prodotta, indipendentemente dal raggiungimento della condizione di risonanza.

8 Appendice

Durante l'anno si sono svolte attività di laboratorio che hanno permesso di migliorare i modelli disponibili in letteratura per il calcolo della risposta dei dispositivi REWEC3. In questo contesto, abbiamo rivisitato il modello idrodinamico utilizzato per descrivere le oscillazioni della colonna d'acqua, sfruttando i dati di un esperimento in campo su un REWEC3 installato presso il laboratorio NOEL (Natural Ocean Engineering Laboratory). Il modello è dotato di strumentazione per misurare la pressione onda all'apertura del condotto da U e la pressione dell'acqua all'interno del cassone. Questi dati vengono usati per dimostrare che il modello attuale non descrive perfettamente le oscillazioni della colonna d'acqua nel dominio del tempo a causa di una rappresentazione approssimativa delle perdite di carico. Contemporaneamente, un modello basato su una diversa rappresentazione delle perdite di carico è stato definito e validato. In particolare, si è utilizzato il modello basato sull'accelerazione istantanea. Questo modello è stato esaminato nel problema colpo d'ariete e nel contesto delle reti idriche. Tuttavia, risulta particolarmente efficace anche per lo studio degli U-OWC. Maggiori dettagli sono disponibili nella Ref. [23].

Attualmente il modello proposto in letteratura utilizza la formulazione di Darcy-Weishbach per il calcolo delle perdite di carico. Tale formulazione è applicabile allo studio di correnti stazionarie, ma non vi è alcun motivo per cui possa essere applicato allo studio del moto vario, quale quello che si innesca negli U-OWC. Pertanto, seguendo un approccio proposto da Daily, *et al.* [24], si è assunto che le perdite di carico in una corrente non-stazionaria possa essere scomposta in un contributo stazionario ed in un contributo non-stazionario secondo l'equazione

$$\Delta h = \Delta h_{st} + \Delta h_{un}, \quad (\text{A.1})$$

in cui i termini a secondo membro si calcolano tramite l'equazione

$$\Delta h_{st} = C_{dg} \left\{ \frac{l_i}{R_{h,1}} \left(\frac{b_2}{b_1} \right)^2 + \frac{l_i + h + h_c - \xi}{R_{h,2}} \right\} \frac{|\dot{\xi}| |\ddot{\xi}|}{2g}, \quad (\text{A.2})$$

e

$$\Delta h_{un} = C_{in} \left\{ \frac{l_i}{g} \left(\frac{b_2}{b_1} \right)^2 + \frac{l_i + h + h_c - \xi}{g} \right\} \ddot{\xi}, \quad (\text{A.3})$$

dove si sono definiti $R_{h,1}$ and $R_{h,2}$ i raggi idraulici delle sezioni esterne ed interne dell'impianto:

$$R_{h,1} = \frac{b_1 b_3}{2(b_1 + b_3)}, \quad (\text{A.4})$$

e

$$R_{h,2} = \frac{b_2 b_3}{2(b_2 + b_3)}. \quad (\text{A.5})$$

I coefficienti C_{dg} e C_{in} sono coefficienti determinati sperimentalmente.

Si osservi che il contributo stazionario è ancora basato sulla formulazione di Darcy-Weishbach delle perdite di carico, tuttavia essa computa le perdite sia lungo il condotto esterno che nella camera interna. Il contributo non-stazionario computa delle perdite proporzionalmente all'inerzia della colonna d'acqua.

L'attività sperimentale è stato condotta presso il NOEL (www.noel.unirc.it). Precedenti attività sperimentali hanno dimostrato che questo sito permette di condurre esperimenti sul campo con i metodi e gli strumenti comunemente utilizzati in grandi vasche ondogene (si vedano i lavori di Boccotti [20] e Arena and Barbaro [25]). Il sito è caratterizzato da onde generate da un venti che per molte ore al giorno spirano stabilmente sul bacino generando onde incidenti con funzioni di densità spettrale di potenza tipiche delle onde pure di vento, quali JONSWAP e Pierson-Moskowitz [26, 27], con periodi di picco spettrali di 2-4s e altezza significativa fra 0.2-0.8m. Inoltre, il sito è caratterizzato da variazioni di marea di circa $\pm 0,15$ m.

Le figure **A.1** e **A.2** mostrano sezione e pianta del modello in scala dell'U-OWC. L'U-OWC è installato ad una profondità di circa 1,7 m ed ha una camera d'aria la cui sommità è a circa 1,9 m al di sopra del livello di

medio mare (entrambi i valori essendo dipendente dal livello di marea). L'altezza complessiva della struttura è 3,57 m. La larghezza del condotto verticale è 0,5 m e la sua lunghezza è 0,8 m. La camera interna è di 1 m di larghezza. Il cassone comprende tre camere indipendenti che coprono una larghezza totale (in direzione trasversale) di 3,79 m (vedi Fig. A.2).

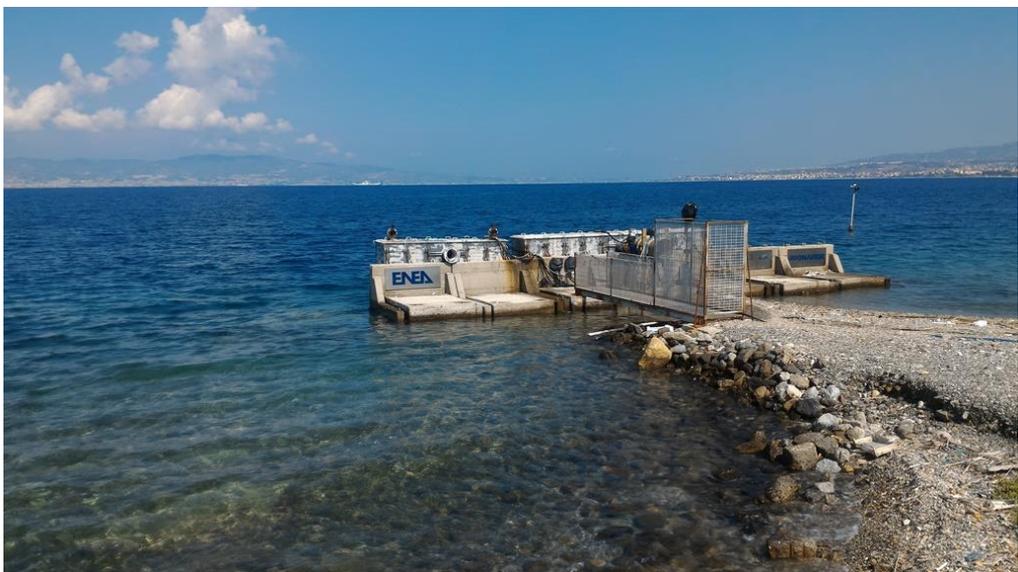


Figura A.0. Due immagini del cassone REWEC3 nel laboratorio NOEL, finanziato nel PAR2014.

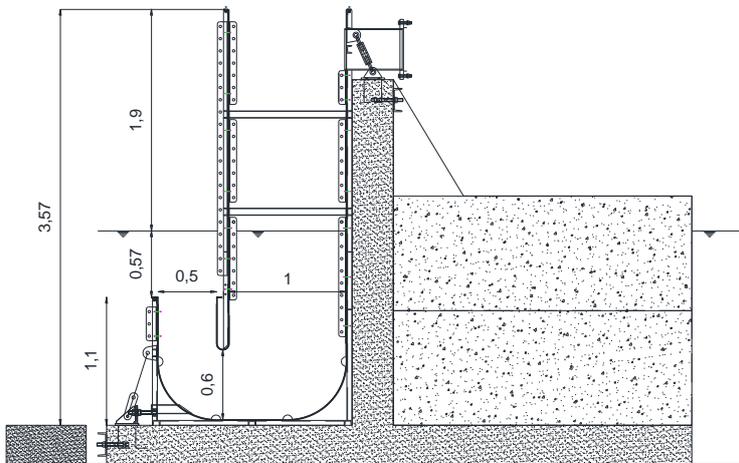


Figura A.1. Sezione trasversale del modello REWEC3 in scala. La camera d'aria è completamente aperta. Le unità sono espresse in metri.

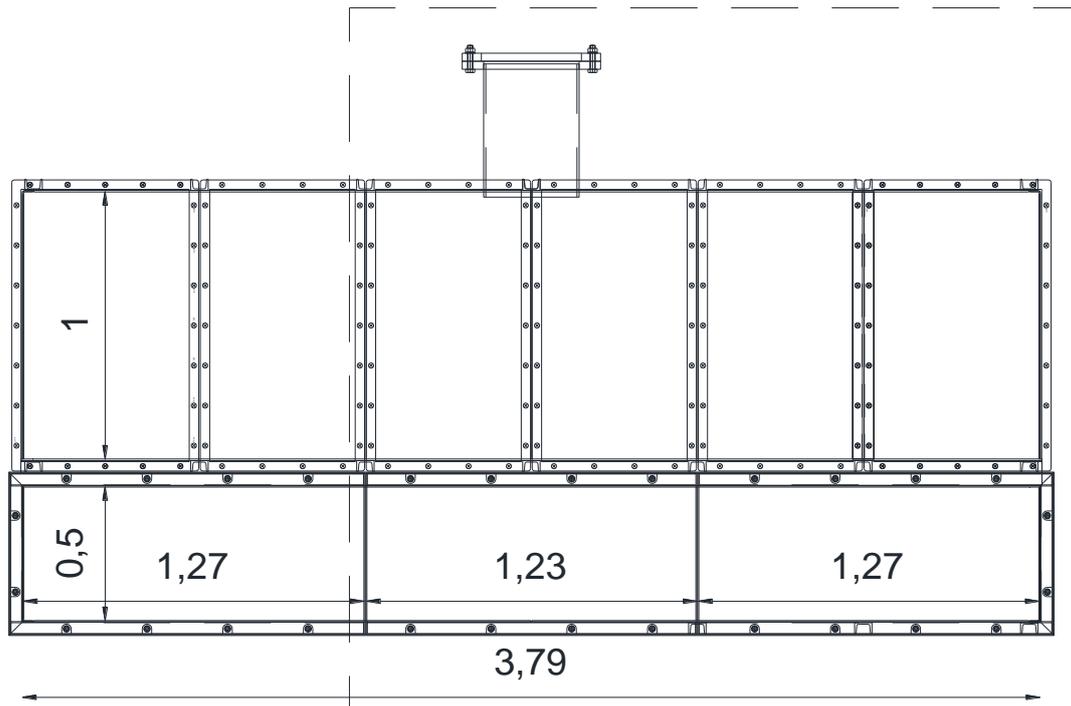


Figura A.2. Vista in pianta del modello REWEC3 in scala. Il riquadro mostra le camere monitorate. Le unità sono espresse in metri.

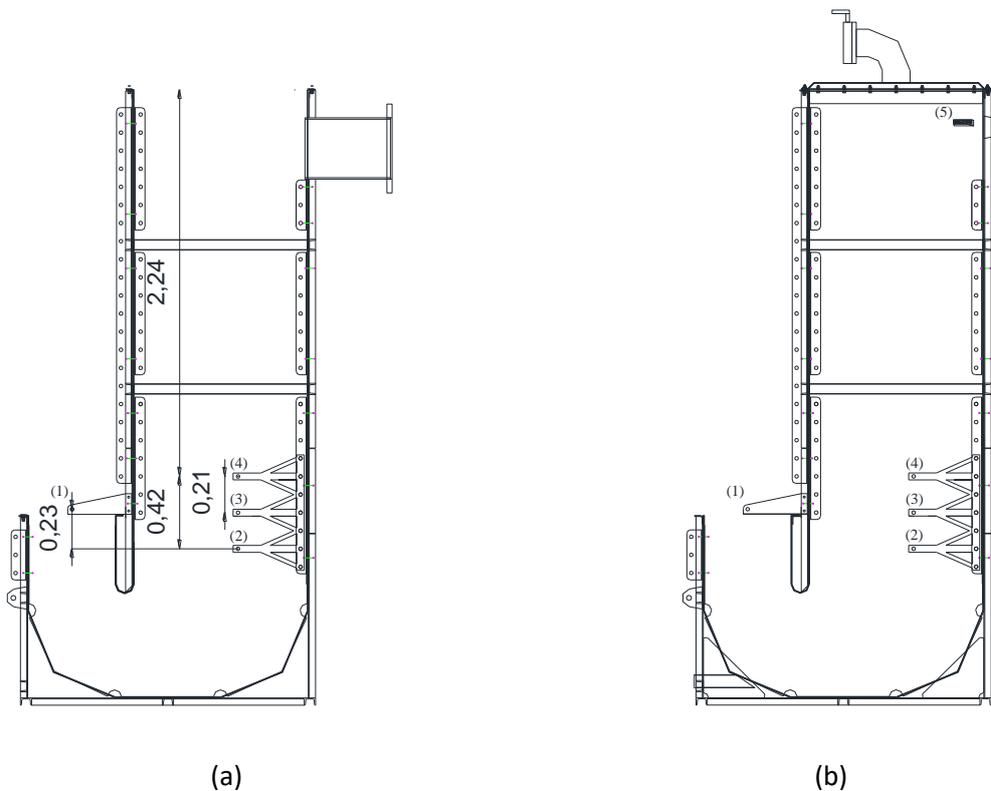


Figura A.3. Posizione degli strumenti installati all'interno dei cassoni REWEC3 presso il NOEL.

L'attività sperimentale è stata condotta su due camere aventi una larghezza di 1,23 m (camera centrale) e 1,27 m (camera laterale). La Tabella A.1 riassume le caratteristiche geometriche del modello.

Tabella A.1. Dimensioni del modello REWEC3 installato presso il NOEL.

	b_1 [m]	b_2 [m]	b_3 [m]	l_i [m]	$h+h_c$ [m]
Camera centrale	0,5	1,0	1,23	0,80	2,47
Camera laterale			1,27		

La sperimentazione è stata condotta in due fasi: nella prima fase, la camera centrale è monitorata senza camera d'aria rimuovendo la piastra di copertura, come mostrato in fig. **A.1**; nella seconda fase, la camera laterale è monitorata includendo la camera d'aria. Questa procedura viene utilizzata per escludere l'influenza della pressione dell'aria durante l'analisi delle oscillazioni colonna d'acqua, in modo che la pressione sulla superficie libera interna sia costantemente la pressione atmosferica. In questo contesto, vengono calibrati i coefficienti C_{in} e C_{dg} . Il secondo passo è stato considerato per validare l'affidabilità del modello in condizioni operative.

Ogni camera è dotata di quattro trasduttori di pressione (PT) come mostrato in fig. **A.3**. PT (1) si trova all'imboccatura del condotto ad U. Viene utilizzato per misurare la pressione istantanea agente sulla colonna d'acqua. Questa quantità è la sollecitazione del sistema e viene utilizzata per quantificare le fluttuazioni di pressione esterne. PT (2-4) forniscono una misura della pressione istantanea all'interno della colonna d'acqua e sono utilizzati per stimare indirettamente lo spostamento della superficie libera interna. A questo scopo, si è adottata la tecnica di misura descritta precedentemente. In particolare, considerando le misurazioni simultanee di due PT, si calcola l'accelerazione istantanea della colonna d'acqua come

$$a = \frac{p_l - p_u}{\rho \Delta z} - g \quad , \quad (A.6)$$

dove p_l e p_u sono le pressioni istantanee misurate, rispettivamente, dal PT inferiore e superiore e Δz è la distanza verticale tra loro. Successivamente, il livello istantaneo della superficie libera interna misurata dalla estremità superiore del cassone è stimata come

$$\xi = z_l - \frac{p_l}{\rho(g + a)} \quad . \quad (A.7)$$

essendo z_l la distanza tra il PT inferiore e la cima dell'U-OWC. L'uso di tre PT consente di ottenere misurazioni ridondanti della stessa quantità, che sono utilizzati per controllare l'affidabilità della misura. La camera laterale è equipaggiata come quella centrale, ma un PT supplementare è installato nella camera d'aria. Viene utilizzato per misurare la pressione dell'aria e, quindi, calcolare la quota istantanea della colonna d'acqua come già discusso per l'impianto prototipale.

I dati sono registrati con una frequenza di campionamento di 10 Hz. La durata di ogni record è 5 min. Cioché ogni record comprende 3000 campioni. Complessivamente, 537 registrazioni sono state raccolte durante la prima fase dell'esperimento, mentre 158 registrazioni sono state ottenute durante la seconda fase. Globalmente, i record rappresentano una varietà di stati di mare, comprendenti spettri unimodali e bimodali, stati di mare generati dal vento e di mare lungo, e spettri direzionali con una direzione dominante con obliquità $|\theta| < 30^\circ$ rispetto all'U-OWC ($\theta = 0^\circ$ rappresenta il caso di attacco d'onda ortogonale). In termini di caratteristiche spettrali, le registrazioni disponibili sono rappresentative delle condizioni tipiche del NOEL (altezza significativa tra 0,2 metri e 0,8 metri, con periodi di picco tra 2 e 4 s).

8.1 I risultati della prima fase dell'esperimento

I record grezzi vengono elaborati determinando, prima, lo spostamento della superficie libera interna secondo la procedura descritta al punto 3. Quindi, il modello teorico basato è impiegato per stimare la risposta del sistema a partire da una registrazione della sollecitazione. L'integrazione dell'equazione è condotta per via numerica tramite l'approccio di Newmark [28] in cui il passo di integrazione è 0,1s e la condizione iniziale è determinata direttamente dalla registrazione. In questo contesto, entrambi i modelli definiti dall'eq. (A.2) e (A.3) sono implementati. In particolare, l'eq. (A.2) viene utilizzata per calcolare la risposta in base ai risultati di Boccotti [3], in cui $K_w = 0,75$. L'eq. (A.3) è utilizzata stimando, in primo luogo, i valori ottimali di C_{in} e C_{dg} . Successivamente, con questi parametri ottimali sono utilizzati per calcolare la risposta dell'U-OWC.

Per stimare i parametri ottimali, è definita la seguente funzione di errore:

$$\varepsilon = \frac{\|\xi_{\text{meas}} - \xi_{\text{calc}}\|}{\|\xi_{\text{meas}} - \bar{\xi}_{\text{meas}}\|}, \quad (\text{A.8})$$

dove ξ_{meas} è lo spostamento misurato, ξ_{calc} è lo spostamento calcolato, $\bar{\xi}$ è lo spostamento medio misurato e $\|\cdot\|$ denota la norma euclidea. La risposta dell'U-OWC è calcolata per varie coppie $C_{in} - C_{dg}$. Quindi, viene selezionata la coppia che minimizza l'errore (11). Questa procedura di identificazione è stato perseguito in considerazione $C_{in} \in [0,1]$ and $C_{dg} \in [0,05,7]$. Questi intervalli si sono dimostrati sufficienti per identificare le coppie ottimali in tutti i record.

Figura **A.4** mostra la dipendenza dell'errore (A.8) da C_{in} e C_{dg} per il record n. 523 e mette in evidenza il fatto che questo problema di ottimizzazione ammette una soluzione unica. Per tale record i coefficienti ottimali sono $C_{in} = 0,15$ e $C_{dg} = 0,75$. Figura **A.5** mostra un confronto tra le risposte. Si confrontano i dati sperimentali con le risposte calcolate da entrambe le eq. (A.2) e (A.3) (calcolato, quest'ultimo con i valori ottimali di $C_{in} - C_{dg}$). In questo contesto, si vede che eq. (A.2) produce una sovrastima generale della risposta del sistema per tutta la durata della registrazione, mentre eq. (A.3) è in grado di descrivere meglio la storia tempo della risposta. In questo caso, l'errore associato all'eq. (A.2) è 1,03, mentre l'errore associato all'eq. (A.3) è 0,29. Le risposte dell'U-OWC, i coefficienti $C_{in} - C_{dg}$ ottimali e i relativi errori ε sono calcolati per tutti i record. I risultati numerici hanno mostrato una variabilità dei coefficienti e la qualità della previsione varia record per record. Infatti, C_{in} varia nell'intervallo $[0, 0,25]$, C_{dg} varia nell'intervallo $[0,5, 1,3]$ (vedi fig. **A.6**), mentre l'errore associato a ciascuna coppia varia nell'intervallo $[0,17, 0,5]$ (fig. **A.7**).

8.2 Confronto tra le risposte associate all'eq. (A.2) e eq. (A.3).

Per dimostrare l'affidabilità dell'eq. (A.2) e (A.3) si è assunto che i parametri $C_{in} - C_{dg}$ assumano valori costanti. In particolare, si sono utilizzati i valori mostrati in tab. A.2. Queste quantità sono state valutate calcolando la media dei valori ottimali associati a ciascun record relativi alla prima fase dell'attività sperimentale.

Tabella A.2. Valori di C_{in} e di C_{dg} attesi.

\bar{C}_{in}	\bar{C}_{dg}
0,13	0,71

L'affidabilità del modello è valutata in termini di previsione delle statistiche della risposta. A questo scopo, le sollecitazioni registrate sono utilizzate per stimare la risposta dell'U-OWC. Poi, data la storia temporale ξ , la deviazione standard ($\sigma_{\xi_{\text{calc}}}$) è determinata. Questa quantità viene confrontata con il corrispondente valore misurato ($\sigma_{\xi_{\text{meas}}}$). La figura **A.8** mostra un confronto diretto tra le deviazioni standard previste e quelle misurate per ciascuna delle 537 registrazioni ottenute durante la prima fase dell'esperimento. I due pannelli si riferiscono alle risposte previste dall'eq. (A.2) (fig. **A.8** (a)) e dall'eq. (A.3) (fig. **A.8** (b)). Si è visto che eq. (A.2) produce generalmente una sovrastima della risposta, che invece sono previste meglio dall'eq. (A.3).

Una quantificazione degli errori associati ad entrambe le rappresentazioni delle perdite di carico è dato nella tabella A.3. Essa mostra la media e i massimi degli errori calcolati per tutti i record. Si è visto che eq. (A.3) è in grado di prevedere la risposta migliore rispetto al modello precedente. A questo proposito, fig. **A.9** mostra che la stima è sistematicamente migliore tramite eq. (A.3).

Tabella A.3. Valore massimo e medio dell'errore associato all'eq. (A.2) e (A.3)

	Eq. (A.2)	Eq. (A.3)
Max(ε)	1,59	0,58
$\bar{\varepsilon}$	0,93	0,34

8.3 I risultati della seconda fase dell'esperimento: confronto con i dati di un U-OWC operativo.

Le prestazioni di entrambi i modelli sono valutate considerando un U-OWC operativo. Cioè, il modello U-OWC con una camera d'aria (fig. A.3 (b)). I dati raccolti durante questa seconda fase sono utilizzati per stimare le statistiche della risposta ed i relativi errori. Tuttavia, essi non sono utilizzati per la calibratura dei coefficienti. Invece, quelli stimati durante la prima fase dell'esperimento sono utilizzati.

La figura A.10 mostra un confronto tra le statistiche della risposta. Anche in questo contesto, si vede che eq. (A.3) fornisce stime migliori, mentre eq. (A.2) sovrastima la risposta. Errori massimi e medi sono riportati in tab. A.4 e confermano che il modello proposto prevede una migliore quantificazione della risposta del REWEC3. Infine, la fig. A.11 sottolinea il fatto che il miglioramento è sistematico ed è indipendente dalla specifica storia temporale della sollecitazione.

Tabella A.4. Valore massimo e medio dell'errore associato all'eq. (A.2) e (A.3)

	Eq. (A.2)	Eq. (A.3)
Max(ϵ)	1,54	0,7
$\bar{\epsilon}$	1,12	0,34

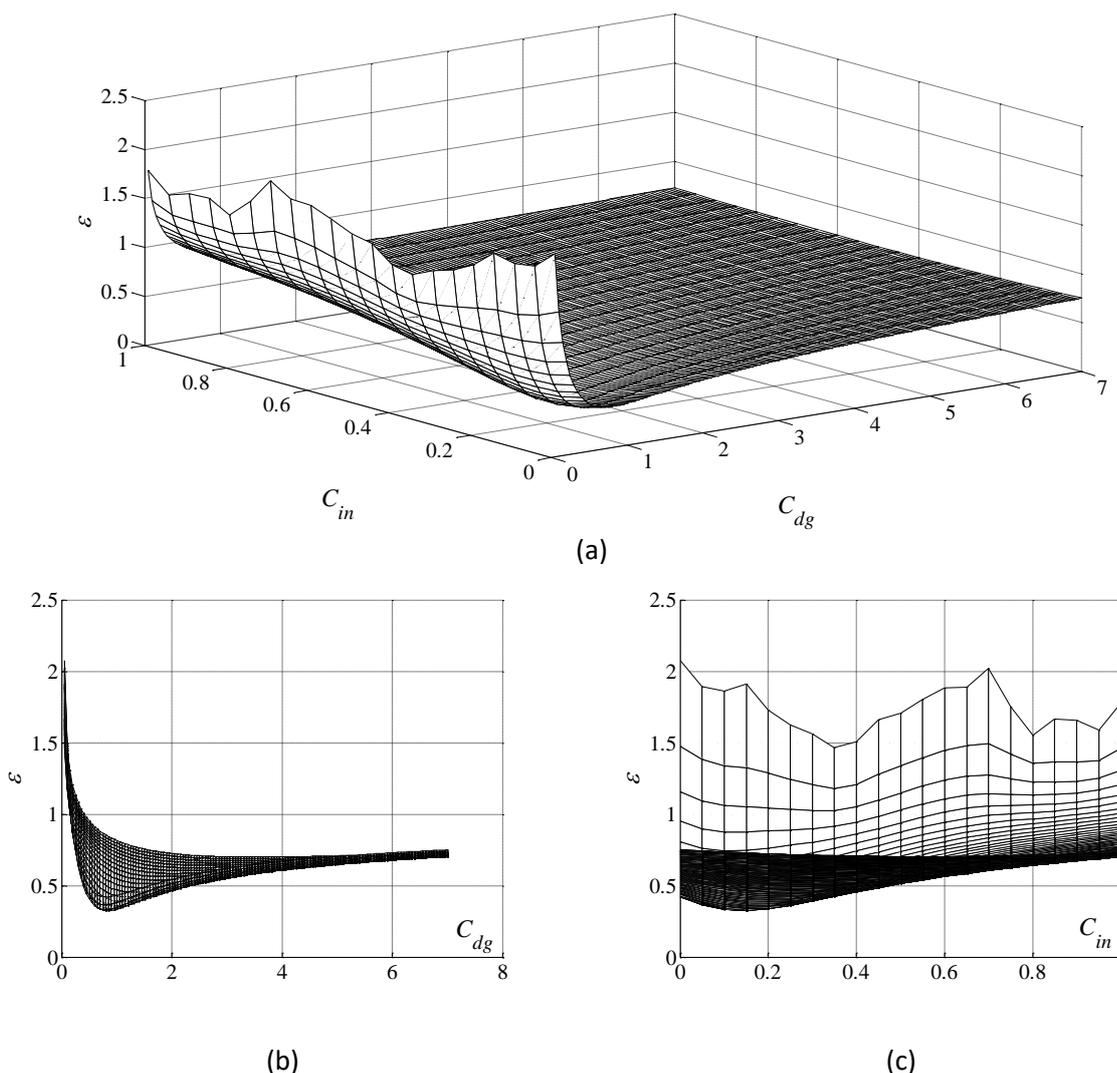


Figura A.4. Funzione errore (A.8) calcolata nel dominio $C_{in} - C_{dg}$ per il record 523.

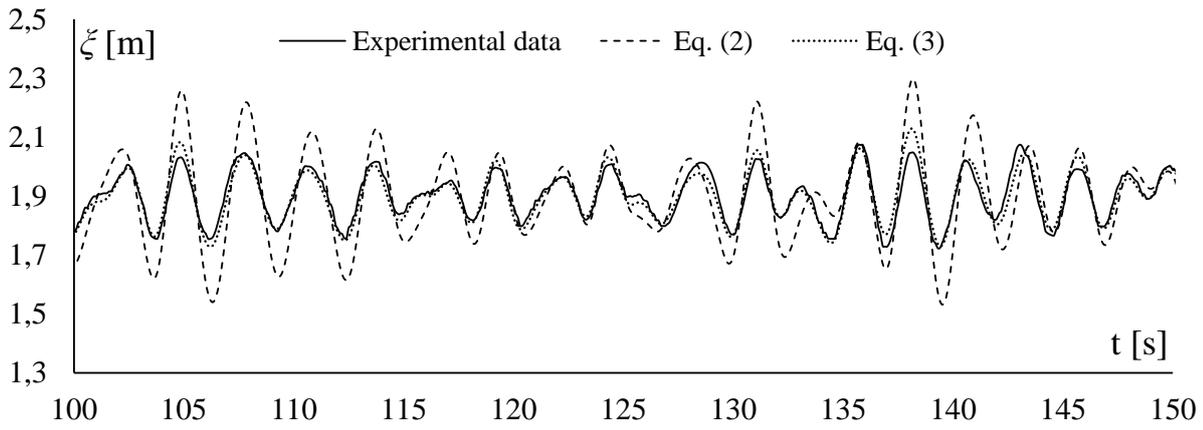


Figura A.5. Confronta tra l'Eq. (A.2), (A.3) e il dato sperimentale.

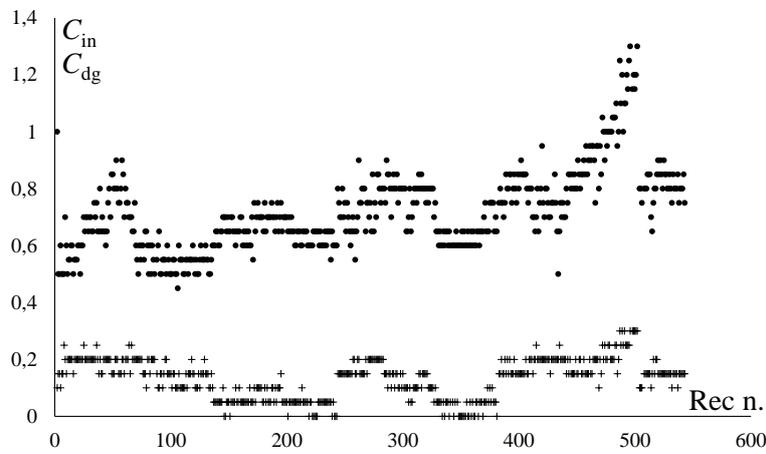


Figura A.6. Parametri ottimali C_{in} e C_{dg} ottenuti per tutte le registrazioni.

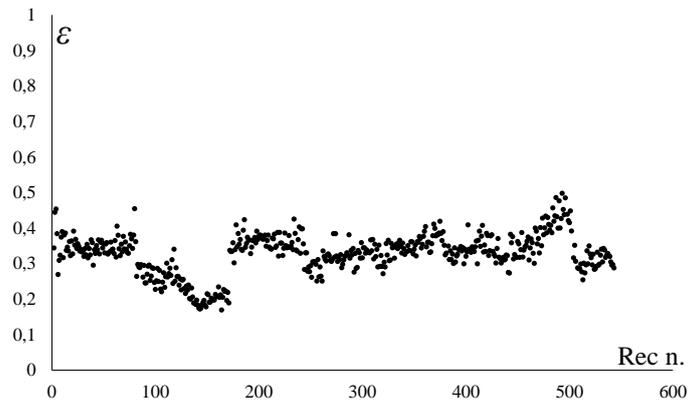


Figura A.7. Errore associato a tutte le registrazioni.

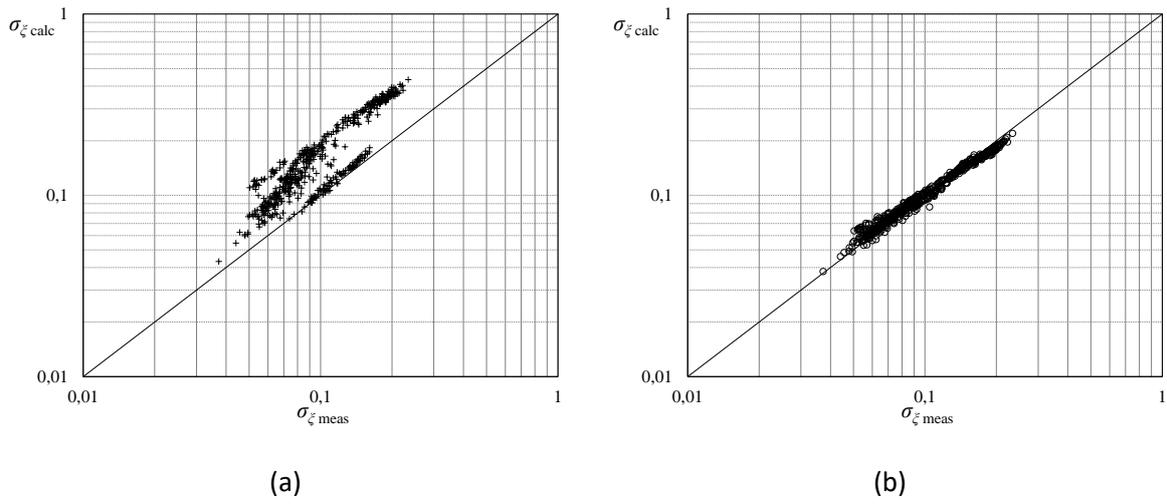


Figura A.8. Confronto tra deviazioni standard misurate e calcolate tramite l'eq. (A.2) (sinistra) e (A.3) (destra).

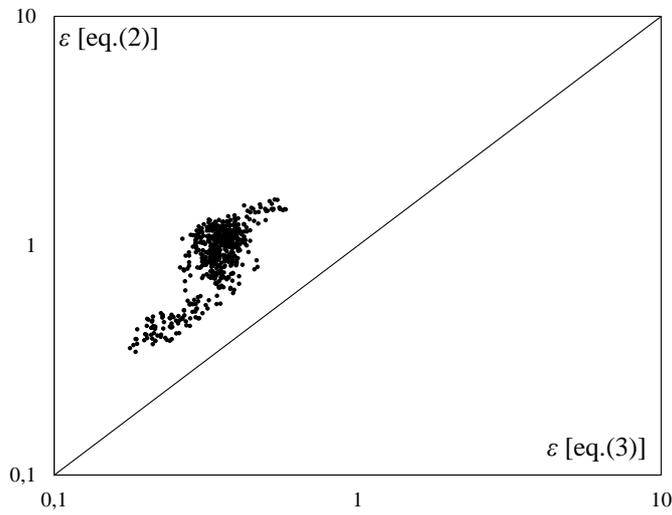


Figura A.9. Confronto tra gli errori calcolati tramite l'eq. (A.2) e l'eq. (A.3).

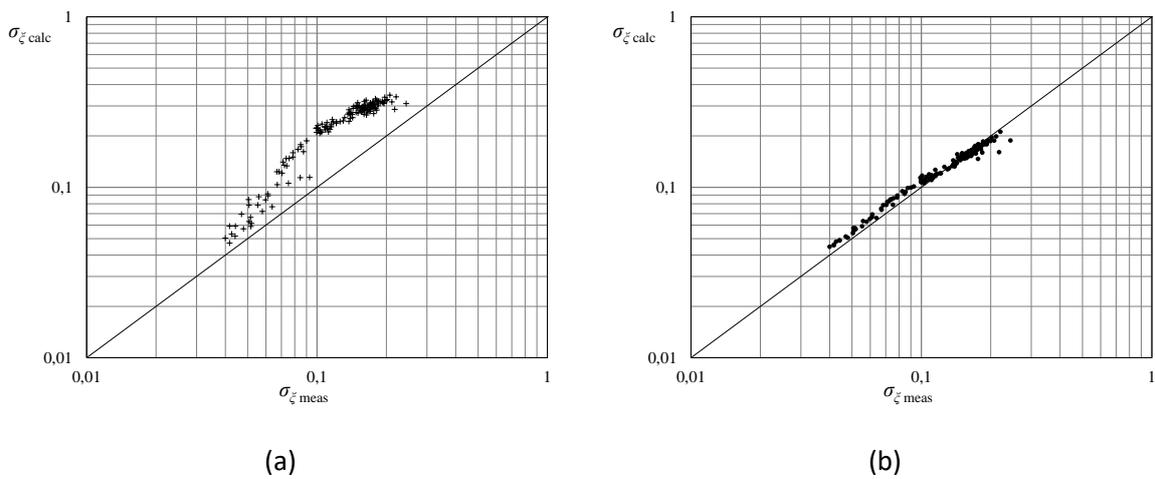


Figura A.10. Confronto tra deviazioni standard misurate e calcolate tramite l'eq. (A.2) (sinistra) e (A.3) (destra).

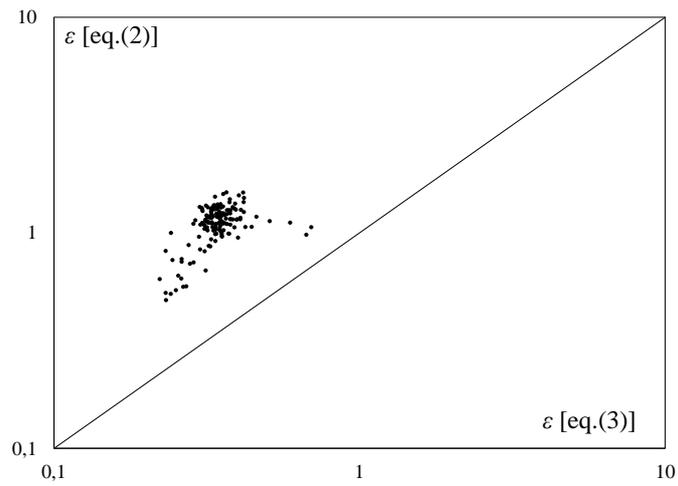


Figura A.11. Confronto tra gli errori calcolati tramite l'eq. (A.2) e l'eq. (A.3).

9 Riferimenti bibliografici

1. P. Boccotti, "On a new wave energy absorber", *Ocean Engineering*, 30 (2003), pp. 1191-1200.
2. P. Boccotti, "Comparison between a U-OWC and a conventional OWC", *Ocean Engineering*, 34 (2007), pp. 799-805.
3. P. Boccotti, "Caisson breakwaters embodying an OWC with a small opening—Part I: Theory", *Ocean Engineering*, 34 (2007), pp. 806-819.
4. P. Boccotti, P. Filianoti, V. Fiamma and F. Arena, "Caisson breakwaters embodying an OWC with a small opening-Part II: A small-scale field experiment", *Ocean Engineering*, 34 (2007), pp. 820-841.
5. G. Malara and F. Arena, "Analytical modelling of an U-Oscillating Water Column and performance in random waves", *Renewable Energy*, 60 (2013), pp. 116-126.
6. F. Arena, A. Romolo, G. Malara and A. Ascanelli, "On design and building of a U-OWC wave energy converter in the Mediterranean Sea: a case study", in: 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2013, Nantes, France, 2013.
7. A. Bargagli, A. Carillo, V. Ruggiero, P. Lanucara and S. G., "Modello di onde per l' area mediterranea", in: Report Ricerca Sistema Elettrico, Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile - ENEA, 2011.
8. L.H. Holthuijsen, N. Booij and T.H.C. Herbers, "A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents", *Coastal Engineering*, 13 (1989), pp. 23-54.
9. G.J. Komen, L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann and P.A.E.M. Janssen, "Dynamics and Modelling of Ocean Waves", Cambridge University Press, (1996).
10. I.R. Young, "Wind Generated Ocean Waves", Elsevier Science, (1999).
11. J. Falnes, "Ocean Waves and Oscillating Systems: Linear Interactions Including Wave-Energy Extraction", Cambridge University Press, (2002).
12. A.F.d.O. Falcão and R.J.A. Rodrigues, "Stochastic modelling of OWC wave power plant performance", *Applied Ocean Research*, 24 (2002), pp. 59-71.
13. M. Shinozuka and G. Deodatis, "Simulation of Stochastic Processes by Spectral Representation", *Applied Mechanics Reviews*, 44 (1991), pp. 191-204.
14. C.C. Mei, M. Stiassnie and D.K.P. Yue, "Theory and Applications of Ocean Surface Waves: linear aspects ; Part 2, nonlinear aspects", World Scientific, Singapore, (2005).
15. W.E. Cummins, "The impulse response function and ship motions", *Schiffstechnik*, 9 (1962), pp. 101-109.
16. A.F.d.O. Falcão, "Control of an oscillating-water-column wave power plant for maximum energy production", *Applied Ocean Research*, 24 (2002), pp. 73-82.
17. R. Curran and L.M.C. Gato, "The energy conversion performance of several types of Wells turbine designs", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 211 (1997), pp. 133-145.
18. P. Boccotti, "Diga a cassoni in grado di assorbire l'energia ondata e trasformarla in energia elettrica", Brevetto Italiano N. 1332519.
19. F.M. Strati, G. Malara and F. Arena, "Performance optimization of a U-Oscillating-Water-Column wave energy harvester", *Renewable Energy*, 99 (2016), pp. 1019-1028.
20. P. Boccotti, "Wave Mechanics and Wave Loads on Marine Structures", Butterworth-Heinemann, Oxford, (2015).
21. P. Boccotti, "Design of breakwater for conversion of wave energy into electrical energy", *Ocean Engineering*, 51 (2012), pp. 106-118.
22. F. Arena, A. Romolo, G. Malara, V. Fiamma and V. Laface, "The first worldwide application at full-scale of the REWEC3 device in the Port of Civitavecchia: initial energetic performances", in: 2st International Conference on Renewable Energies Offshore, Lisbon, Portugal, 2016.
23. G. Malara, A. Romolo, V. Fiamma and F. Arena, "On the modelling of water column oscillations in U-OWC energy harvesters", *Renewable Energy*, in press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.051>

24. J.W. Daily, W.L. Hankey, R.W. Olive and J.M. Jordaan, "Resistance Coefficients for Accelerated and Decelerated Flows Through Smooth Tubes and Orifices", *Transaction of ASME*, 78 (1956), pp. 1071-1077.
25. F. Arena and G. Barbaro, "The Natural Ocean Engineering Laboratory, NOEL, in Reggio Calabria, Italy: A Commentary and Announcement", *Journal of Coastal Research*, (2013), pp. vii-x.
26. K. Hasselmann, T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Eake, J.A. Euring, A. Gicnapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Mullen, D.J. Olbers, K. Richren, W. Sell and H. Walden, "Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint North Sea wave project (JONSWAP)", *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift*, A8 (1973), pp. 1-95.
27. W.J. Pierson and L. Moskowitz, "A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S. A. Kitaigorodskii", *Journal of Geophysical Research*, 69 (1964), pp. 5181-5190.
28. R.W. Clough and J. Penzien, "Dynamics of structures", McGraw-Hill, New York, USA, (1975).