



Ricerca di Sistema elettrico

## Ottimizzazione di dispositivi U-OWC (U-Oscillating Water Column) e progettazione di test sperimentali

*F. Arena, V. Laface, G. Malara,  
A. Romolo, A. Viviano*

## OTTIMIZZAZIONE DI DISPOSITIVI U-OWC (U-OSCILLATING WATER COLUMN) E PROGETTAZIONE DI TEST SPERIMENTALI

F. Arena, V. Laface, G. Malara, A. Romolo, A. Viviano (Università Mediterranea di Reggio Calabria)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi e valutazione sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso

Obiettivo: B3 Ottimizzazione di dispositivi U-OWC in funzione dello stato del mare

Responsabile del Progetto: G. Sannino, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Elaborazione di dati meteomarini da modelli ad alta risoluzione in prossimità di aree portuali e ottimizzazione di dispositivi U-OWC" tra ENEA e l'Università Mediterranea di Reggio Calabria, Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Energia, dell'Ambiente e dei Materiali "

Responsabile scientifico ENEA: Gianmaria Sannino

Responsabile scientifico Università Mediterranea di Reggio Calabria: Felice Arena

Si ringrazia la società WAVENERGY.IT s.r.l., Spin Off dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria per il supporto fornito nella redazione della parte II del rapporto, sui dispositivi REWEC3.

## Indice

SOMMARIO.....	4
OTTIMIZZAZIONE DI DISPOSITIVI U-OWC (OSCILLATING WATER COLUMN) E PROGETTAZIONE DI TEST SPERIMENTALI .	5
I. DISPOSITIVI U-OWC (OSCILLATING WATER COLUMN) .....	5
I.1 INTRODUZIONE AI SISTEMI A COLONNA D'ACQUA OSCILLANTE.....	5
I.2 PROGETTAZIONE OTTIMIZZATA DI SISTEMI U-OWC.....	7
II. PROGETTAZIONE DI UN DISPOSITIVO U-OWC PER UNA ASSEGNATA LOCALITÀ.....	10
II.1 PROGETTAZIONE OTTIMIZZATA DELLE PARTI ATTIVE DI UN DISPOSITIVO U-OWC PER LA COSTA NORD-OVEST DELLA SARDEGNA (CAPO DELL'ARGENTIERA). .....	10
II.2 DIMENSIONAMENTO DI UNA DIGA PORTUALE A CASSONI CON INCORPORATO IMPIANTO U-OWC PER LA COSTA NORD-OVEST DELLA SARDEGNA (CAPO DELL'ARGENTIERA). .....	13
II.3 STUDIO DI EQUILIBRIO AL GALLEGGIAMENTO DURANTE LA FASE DI TRASPORTO PER UN CASSONE DI TIPO U-OWC.....	15
III. IMPIANTO SPERIMENTALE CON MODELLO IN SCALA DI U-OWC.....	18
II.4 CARATTERISTICHE DI DETTAGLIO DELL'ATTIVITÀ SPERIMENTALE DEL PROGETTO 'ENERGIA DAL MARE' E DEL PROGETTO POSEIDONE.	18
II.5 PROGETTAZIONE ATTIVITÀ SPERIMENTALI .....	23
II.6 NOTA CONCLUSIVA.....	24
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	34
IV. CLIMA ONDOSO E ENERGIA DISPONIBILE A CAPO DELL'ARGENTIERA .....	35
IV.1 INDIVIDUAZIONE DELL' AREA CAMPIONE .....	35
IV.2 CLIMA MEDIO AL LARGO.....	36
IV.3 ENERGIA ONDOSA AL LARGO .....	36
IV.4 METODOLOGIA UTILIZZATA PER LA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO VERSO LA COSTA.....	39
IV.5 RISULTATI DEL MODELLO SW .....	42
IV.6 STIMA DELL'ENERGIA DISPONIBILE SOTTOCOSTA .....	47
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI APPENDICE .....	50
ALLEGATO A. SCHEMA PROGETTUALE DEL SISTEMA U-OWC A CAPO DELL'ARGENTIERA .....	51

## Sommario

Nel presente rapporto vengono analizzati i dispositivi a colonna d'acqua oscillante (Oscillating Water Column OWC), facendo particolare riferimento ai REWEC3 (REsonant Wave Energy Converter – realization 3), noti anche come U-OWC o J-OWC. Tali dispositivi consentono di convertire l'energia ondosa in energia elettrica.

Lo studio dei sistemi U-OWC è stato già oggetto delle analisi effettuate nel report RdS/2012/ 231, nel quale si è effettuato uno studio per il dimensionamento di massima di impianti U-OWC per le tre località di Genova, Pantelleria e Porto Pischera, oggetto di studio del precedente report.

Nel presente report è stata, invece, condotta un'analisi puntuale e dettagliata per il dimensionamento ottimizzato di un impianto U-OWC incorporato in una diga portuale per la località caratterizzata dal maggiore valore di potenziale energetico nel Mare Mediterraneo. La localizzazione di tale punto di interesse è il risultato del report RdS/2013/137. Si tratta del punto 30 localizzato lungo la costa Nord-Ovest della Sardegna (Italia), in corrispondenza di un punto antistante Capo dell'Argentiera.

Dopo avere fornito un inquadramento generale del dispositivo, ed avere illustrato il modello matematico utilizzato per l'idrodinamica dei REWEC3, nel rapporto si procede all'ottimizzazione preliminare del dispositivo. Viene condotta l'analisi completa dei livelli di moto ondoso al largo e sotto costa (v. Appendice), utilizzando il modello Mike21.

Il risultato è che, sulla costa a Nord-Ovest della Sardegna, una diga REWEC3 avente lunghezza di un chilometro è in grado di produrre, mediamente in un anno, quasi 10.000 MWh. Si tratta della massima produzione di energia da moto ondoso ottenibile da una diga REWEC3 lungo le coste del Mediterraneo (con turbina di Wells biplana, considerata nelle analisi).

Lo studio è stato svolto a partire da dati meteo marini considerando il contributo individuale dei livelli di agitazione ondosa delle onde di vento e delle onde di tipo swell. Tale analisi è di particolare interesse per un impianto di U-OWC, in quanto è stato dimostrato da evidenze sperimentali su un modello in scala ridotta testato presso il laboratorio NOEL di ingegneria marittima dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria, come la nuova tipologia di assorbitore è capace di raggiungere degli elevati valori del coefficiente di assorbimento soprattutto sotto l'azione delle onde di tipo swell.

Infine, si è proposto l'allestimento di un impianto sperimentale presso il laboratorio NOEL (Natural Ocean Engineering Laboratory, [www.noel.unirc.it](http://www.noel.unirc.it)) dell'Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria, che potrà essere utilizzato in un prossimo futuro per ulteriori ricerche congiunte con ENEA. Il contributo scientifico di questa futura attività da svolgersi con ENEA è da inquadrarsi nell'ambito dell'ottimizzazione dei cassoni REWEC3. Essa consentirà di definire rigorosi criteri di ottimizzazione utili in fase di progettazione.

## Ottimizzazione di dispositivi U-OWC (Oscillating Water Column) e progettazione di test sperimentali

### I. Dispositivi U-OWC (Oscillating Water Column)

#### I.1 Introduzione ai sistemi a colonna d'acqua oscillante.

I sistemi a colonna d'acqua oscillante, comunemente noti come "Oscillating Water Column" (OWC) sono dei dispositivi aventi lo scopo di convertire l'energia ondosa in energia elettrica. Essi sono composti da una camera rigida posta alla quota di medio mare, avente la superficie inferiore aperta e la superficie superiore chiusa a meno di un foro dal piccolo diametro. Tale sistema, una volta posto in mare, permette la propagazione delle onde incidenti all'interno della camera. Le oscillazioni indotte dal moto ondoso provocano una compressione/espansione della camera d'aria, la quale, a sua volta, provoca un flusso attraverso il foro presente nella superficie superiore. Tale flusso è sfruttato da una turbina "self-rectifying" che permette di trasformare l'energia della corrente d'aria in energia meccanica quale che sia il verso della corrente. Quindi, l'energia meccanica è convertita in energia elettrica. Uno schema semplificato è mostrato in Figura 1 (sinistra). La Figura 1, inoltre, mostra un dispositivo U-OWC (anche noto come REWEC3 nella sua implementazione entro le classiche dighe a parete verticale). Si osservi come la differenza sostanziale tra i due sistemi risieda nella presenza di un condotto addizionale ad U, che collega la colonna d'acqua con il campo di moto esterno. Nonostante la differenza possa apparire minima, in realtà essa è sostanziale ai fini della dinamica del dispositivo. Infatti, gli OWC permettono la propagazione delle onde incidenti all'interno dell'impianto, con conseguente modifica del campo di moto dovuto a fenomeni diffrattivi. Al contrario, le onde incidenti non si propagano all'interno degli impianti U-OWC. In questo contesto, le oscillazioni della colonna d'acqua sono indotte dalle variazioni di pressione all'imboccatura, tramite un meccanismo a pistone.

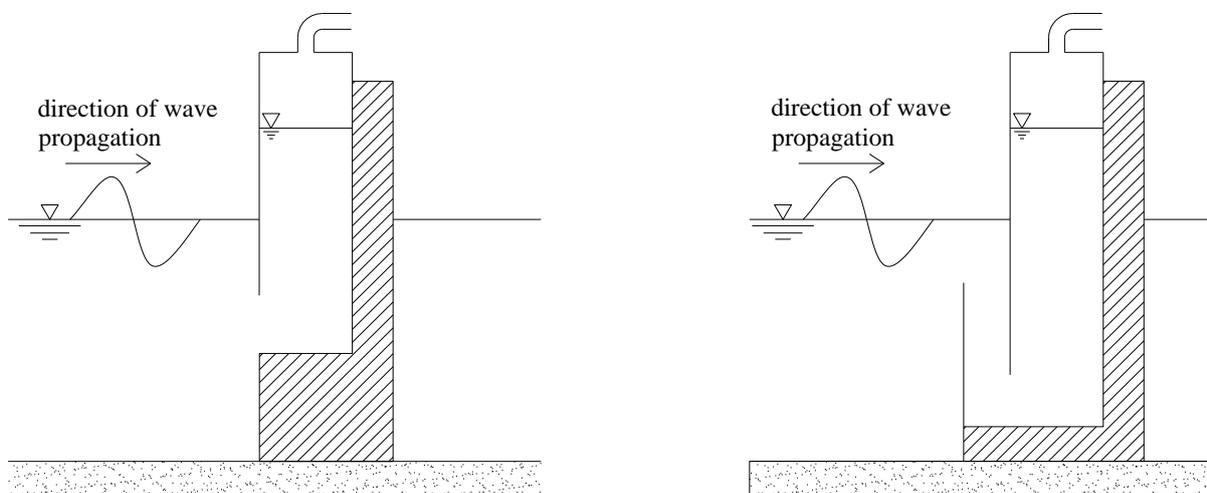
Questa fondamentale differenza ha delle notevoli conseguenze sulle performance del dispositivo. Infatti, come provato da Boccotti (2007b), gli U-OWC hanno un periodo proprio maggiore di un analogo OWC. Inoltre, l'ampiezza delle fluttuazioni di pressione all'imboccatura è maggiore negli U-OWC. Conseguentemente, questo particolare tipo di impianto è in grado di assorbire una maggiore quantità di energia in presenza di stati di mare generati dal vento e di onde di mare lungo. Questo perché un U-OWC, grazie all'introduzione del condotto verticale, può essere progettato al fine di raggiungere la condizione di risonanza per i livelli di agitazione ondosa incidente che convogliano la maggiore quantità di energia durante l'anno. Nei tradizionali OWC, invece, il realizzarsi delle condizioni di risonanza richiede l'attuazione di sistemi tecnologicamente complessi per il controllo di fase di ogni singola onda, capaci di determinare una risonanza forzata del sistema.

Anche dal punto di vista modellistico i due impianti sono differenti. I dettagli analitici saranno analizzati successivamente, tuttavia è utile sottolineare le differenze sostanziali. Innanzitutto, come già citato precedentemente, l'impianto U-OWC non è caratterizzato dalla propagazione del moto ondoso al suo interno. Secondariamente, la presenza del condotto verticale induce delle perdite di carico che si traducono in non-linearità nell'equazione del moto del sistema. Di conseguenza, gli U-OWC sono studiati ed analizzati nel dominio del tempo e non delle frequenze, come invece accade per gli OWC. In questo contesto, lo strumento fondamentale per il calcolo delle quantità statistiche di riferimento (potenza media assorbita, potenza media convertita, ecc.) sono calcolate a partire da simulazioni Monte Carlo, con la successiva interpretazione alla luce delle caratteristiche meteo-marine del sito di riferimento.

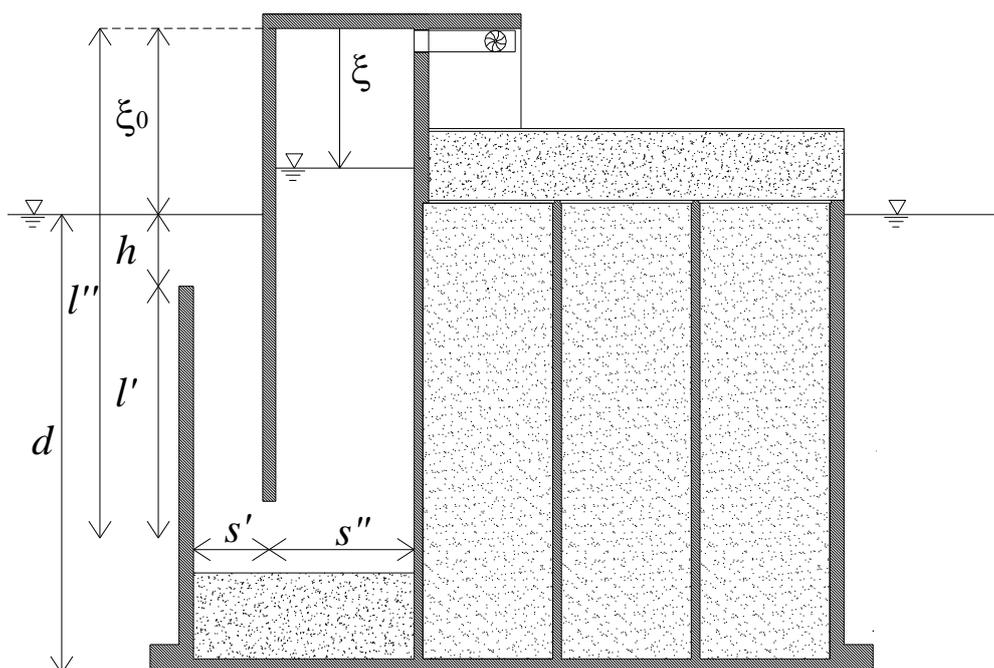
La realizzazione di tali impianti è associata alla costruzione dei classici cassoni a parete verticale utilizzati in ambiti portuale. Tale soluzione è perseguita con l'obiettivo di coniugare i pregi e gli scopi di ciascuna

struttura. Infatti, le dighe a parete verticale permettono di ottenere un bacino protetto dal moto ondoso, mentre gli U-OWC permettono lo sfruttamento efficace dell'energia ondosa, con l'ulteriore vantaggio di ridurre l'ampiezza media delle onde in prossimità della diga. Un esempio di integrazione diga – U-OWC è mostrato in Figura 2. Si può osservare come l'U-OWC si integri perfettamente con il sistema a cassoni permettendo di costruire un impianto che risulta pressoché invisibile dall'esterno. Da un punto di vista strettamente strutturale, l'introduzione del tubo a U non comporta alcuna riduzione dei coefficienti di stabilità globale. A tal riguardo, Boccotti (2007b) ha dimostrato che l'azione dell'onda all'imboccatura si traduce in un sistema sicuro e, paragonato ad un analogo sistema cassone – OWC, con maggiori coefficienti di stabilità globale.

NOTA. I CASSONI REWEC3 (RESONANT WAVE ENERGY CONVERTERS), INDICATI NELLA LETTERATURA SCIENTIFICA INTERNAZIONALE ANCHE COME U-OWC O J-OWC, SONO STATI INVENTATI E BREVETTATI IN ITALIA (BREVETTO N. 1332519 DEL 2006) ED IN EUROPA (BREVETTO N. EP1518052B1 DEL 2007) DAL PROF. PAOLO BOCCOTTI; LA SOCIETÀ WAVENERGY.IT S.R.L. ([WWW.WAVENERGY.IT](http://WWW.WAVENERGY.IT)), SPIN-OFF DELL'UNIVERSITÀ MEDITERRANEA DI REGGIO CALABRIA, È LICENZIATARIA ESCLUSIVA DEL BREVETTO.



**Figura 1.** Sistema OWC (a sinistra) e sistema U-OWC (a destra).



**Figura 2.** Sistema integrato diga a parete verticale – U-OWC.

## 1.2 Progettazione ottimizzata di sistemi U-OWC.

La progettazione di un U-OWC è condotta attraverso un'adeguata descrizione della dinamica dell'impianto a cui sono associate le caratteristiche meteo-marine del paraggio in esame.

La dinamica di un U-OWC è descritta tramite una equazione differenziale non-lineare accoppiata all'equazione di stato associata alla camera d'aria. Seguendo l'approccio di Boccotti (2007a), l'equazione del moto della colonna d'acqua oscillante è espressa tramite il teorema di Bernoulli generalizzato. Ovvero, adottando la simbologia illustrata in Figura 2,

$$\frac{l'}{g} \frac{s''}{s'} \frac{d^2 \xi}{dt^2} + \frac{(l'' - \xi)}{g} \frac{d^2 \xi}{dt^2} = h' - h'' - \Delta h_w, \quad (1)$$

in cui,

$$h' = \xi_0 - \xi + \frac{1}{2g} \left( \frac{d\xi}{dt} \right)^2 + \frac{p_a - p_{atm}}{\rho g}, \quad (2)$$

$$h'' = \frac{\Delta p}{\rho g}, \quad (3)$$

$$\Delta h_w = K_w \frac{u |u|}{2g}, \quad (4)$$

e

$$u = \frac{s''}{s'} \frac{d\xi}{dt}. \quad (5)$$

I simboli nell'eq. (1)-(5) denotano:  $g$  accelerazione di gravità;  $\rho$  densità dell'acqua;  $p_a$  pressione nella sacca d'aria;  $p_{atm}$  pressione atmosferica;  $\Delta p$  pressione ondosa;  $u$  velocità del fluido all'imboccatura; e  $K_w$  coefficiente empirico associato alle perdite continue e localizzate nel condotto verticale, calcolato secondo le evidenze sperimentali di Boccotti (2003).

Tale equazione è accoppiata con la seguente equazione di stato:

$$\frac{p_a}{\rho_a^k} = \frac{p_{atm}}{\rho_{atm}^k}, \quad (6)$$

in cui,  $\rho_a$  è la densità dell'aria,  $\rho_{atm}$  è la densità atmosferica e  $k$  è l'esponente dell'equazione di stato. La densità dell'aria è legata alla massa d'aria all'interno della camera. Cioè,

$$\rho_a = \frac{M_a}{b s'' \xi}, \quad (7)$$

essendo  $M_a$  la massa d'aria e  $b$  la profondità della cella.

Il flusso attraverso il condotto che ospita la turbina è valutato per mezzo di risultati sperimentali concernenti le caratteristiche della turbina stessa. È prassi utilizzare delle rappresentazioni adimensionali che legano il flusso d'aria alla efficienza ed alla caduta di pressione della turbina. A tal riguardo, la velocità dell'aria all'interno del condotto è legata alla pressione nella camera tramite l'equazione,

$$l_a \frac{du_a}{dt} = \frac{p_{atm}}{\rho_{atm}} \frac{k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_a}{p_{atm}} \right)^{1-1/k} - 1 \right] - \Delta h_a g, \quad (8)$$

in cui  $u_a$  è la velocità dell'aria,  $l_a$  è la lunghezza del condotto e  $\Delta h_a$  è la perdita di carico dovuta alla presenza della turbine e al condotto stimato come

$$\Delta h_a = \left( K_a \frac{u_a^2}{g} + \Delta h_T \right) \frac{u_a}{|u_a|}, \quad (9)$$

essendo  $K_a$  un coefficiente che considera le perdite nel condotto e  $\Delta h_T$  le perdite associate alla turbina calcolate tramite curve sperimentali (Curran and Gato, 1997).

Infine, la variazione di massa è legata alla velocità dell'aria nel condotto,

$$\frac{dM_a}{dt} = -\frac{1}{2} (\rho_a + \rho_{atm}) \frac{\pi D^2}{4} u_a, \quad (10)$$

in cui  $D$  è il diametro interno del condotto.

Le equazioni del moto sono integrate numericamente con uno schema alle differenze finite a partire dalle condizioni iniziali,

$$\xi = \xi_0; \quad \frac{d\xi}{dt} = 0; \quad M_a = \rho_{atm} b s'' \xi_0. \quad (11)$$

La forzante del sistema, ovvero la pressione oncosa all'imboccatura, è stimata a partire dalla storia temporale della pressione indotta dalle onde incidenti  $\Delta p_i$ ,

$$\Delta p = C_d \Delta p_i, \quad (12)$$

dove si è definito  $C_d$  il coefficiente di diffrazione, che include le modifiche indotte dalla struttura al campo di moto. La stima di  $C_d$  è legata alle capacità di assorbimento della struttura, ossia

$$C_d = 2 - C_a, \quad (13)$$

in cui  $C_a$  è il coefficiente di assorbimento definito come il rapporto tra l'energia assorbita dall'impianto e l'energia delle onde incidenti. Ovviamente la stima di  $C_a$  è legata alla storia temporale delle fluttuazioni di pressioni, pertanto lo schema di calcolo si avvale di una procedura iterativa che può essere efficacemente condotta assumendo al passo iniziale che  $C_a=0$ .

La progettazione dell'impianto di assorbimento è effettuata tramite una procedura iterativa che ha come obiettivo l'identificazione della configurazione con la massima capacità di assorbimento. Tale condizione è raggiunta in condizioni di risonanza. Pertanto, la progettazione è effettuata utilizzando il seguente indice di risonanza proposto da Boccotti (2007a):

$$R = 4 \frac{T^*}{T_p}, \quad (14)$$

in cui  $T_p$  è il periodo di picco dello spettro e  $T^*$  è l'ascissa del massimo assoluto della funzione di cross-correlazione

$$\Psi(\tau) = \langle \Delta p(t) Q_p(t + \tau) \rangle, \quad (15)$$

essendo  $Q_p$  la portata d'acqua entrante/uscente dall'impianto. Tale coefficiente varia nell'intervallo (-1,1). Nel caso in cui  $R=0$ , l'impianto lavora in condizioni di risonanza.

La variabilità climatica degli stati di mare impone una adeguata valutazione statistica delle caratteristiche ondose del sito di riferimento. In particolare, la progettazione deve essere condotta avendo come punto di riferimento gli stati di mare che trasportano mediamente la maggior quantità di energia. A tal proposito, è necessario osservare che gli stati di mare con altezze significative maggiori, pur trasportando un notevole quantitativo di energia, si verificano raramente, pertanto sono irrilevanti ai fini delle stime medie annue. Al contempo, gli stati di mare con altezze significative contenute, pur essendo molto frequenti, sono associati a quantitativi energetici estremamente modesti.

## II. Progettazione di un dispositivo U-OWC per una assegnata località

### II.1 Progettazione ottimizzata delle parti attive di un dispositivo U-OWC per la costa Nord-Ovest della Sardegna (Capo dell'Argentiera).

La camera di assorbimento di un U-OWC è progettata a partire da dati circa il clima meteo marino. Le informazioni di partenza riguardano: il sito in cui si suppone ubicata la struttura; e la quota del fondale. Si assume che la progettazione sia relativa ad una struttura localizzata nel nord della Sardegna e che sia installata ad una profondità di 30m (vedi Appendice). La localizzazione di tale punto di interesse è il risultato del report RdS/2013/137. Nella località in esame, in corrispondenza di un punto antistante Capo dell'Argentiera, non è attualmente presente una struttura portuale, ma è pensabile per le configurazioni della batimetria e della costa, ipotizzarne un eventuale realizzazione. Sicuramente l'area in esame è di grande interesse per effettuare una possibile stima di produzione di impianto U-OWC in quanto è quella caratterizzata dal maggiore valore di energia ondosa in tutto il bacino del Mar Mediterraneo.

I calcoli per l'U-OWC sono condotti per unità di cella con l'ipotesi progettuale di un impianto a celle indipendenti.

Come menzionato nel precedente paragrafo, il parametro di riferimento per condurre l'ottimizzazione è l'indice di risonanza. Esso è azzerato in corrispondenza degli stati di mare energeticamente più rilevanti. Le stime di produzione sono quindi condotte per determinare l'energia media annua convertita dal dispositivo.

I risultati delle elaborazioni del moto ondoso sono riportati in Tabella 1 e 2, in cui si mostrano le frequenze di accadimento di stati di mare generati dal vento e di onde di mare lungo, rispettivamente. Lo studio disaccoppiato dei livelli di agitazione ondosa delle onde di vento e delle onde di tipo swell, è di particolare interesse per un impianto di U-OWC, in quanto è stato dimostrato da evidenze sperimentali su un modello in scala ridotta testato presso il laboratorio NOEL di ingegneria marittima dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria (Boccotti *et al.* 2007), come la nuova tipologia di assorbitore è capace di raggiungere degli elevati valori del coefficiente di assorbimento soprattutto sotto l'azione delle onde di tipo swell.

I dettagli sulle elaborazioni del moto ondoso (analisi dati sul alti fondali e propagazione sotto costa con il modello MIKE21) sono riportati in appendice.

La definizione dello stato di mare di progetto dell'impianto è stata condotta stimando le potenze incidenti medie statisticamente più significative. La Figura 3 mostra le curve di livello relative alla potenza media annuale associata a determinati stati di mare. È stata ottenuta sovrapponendo i dati relativi alle onde di mare lungo con quelli relativi alle onde di vento. Si nota come per entrambe le famiglie le potenze maggiori provengano dagli stati di mare con periodo medio  $T_m \approx 8s$ . Chiaramente le famiglie sono caratterizzate da differenti rapporti altezza significativa – periodo medio, pertanto le altezze significative associate a tale periodo medio sono marcatamente differenti. Da un punto di vista progettuale questo fattore non è particolarmente significativo, poiché per raggiungere le condizioni di risonanza si è fatto riferimento ai periodi propri di oscillazione della colonna d'acqua.

A partire da questo tipo di analisi congiunta (onde di vento e onde di mare lungo) è stata definita una configurazione ottimizzata di U-OWC capace di massimizzare i livelli di produzione di energia elettrica nella località. Un U-OWC può essere progettato, fissando tutte le grandezze geometriche delle parti attive (condotto verticale e camera di assorbimento), per massimizzare l'efficienza energetica dell'impianto nella località considerata. In tal modo l'impianto può raggiungere la condizione di risonanza per gli stati di mare che convogliano la maggiore quantità di energia durante l'anno. Si noti che, come detto nella sezione I.1, questa è una peculiarità unica dell'U-OWC nella famiglia degli OWC.

La procedura di ottimizzazione dell'impianto ha portato alla identificazione delle caratteristiche geometriche dell'impianto riportate in Tabella 3. Inoltre, si è adottata una turbina di Wells biplana.

L'energia media annuale convertita dalla singola turbina è mostrata in Figura 4. Per ciascuno stato di mare le energie convertite maggiori sono relative ai periodo di progetto e, in particolare, si evince che i maggiori contributi sono relativi alle onde di mare lungo.

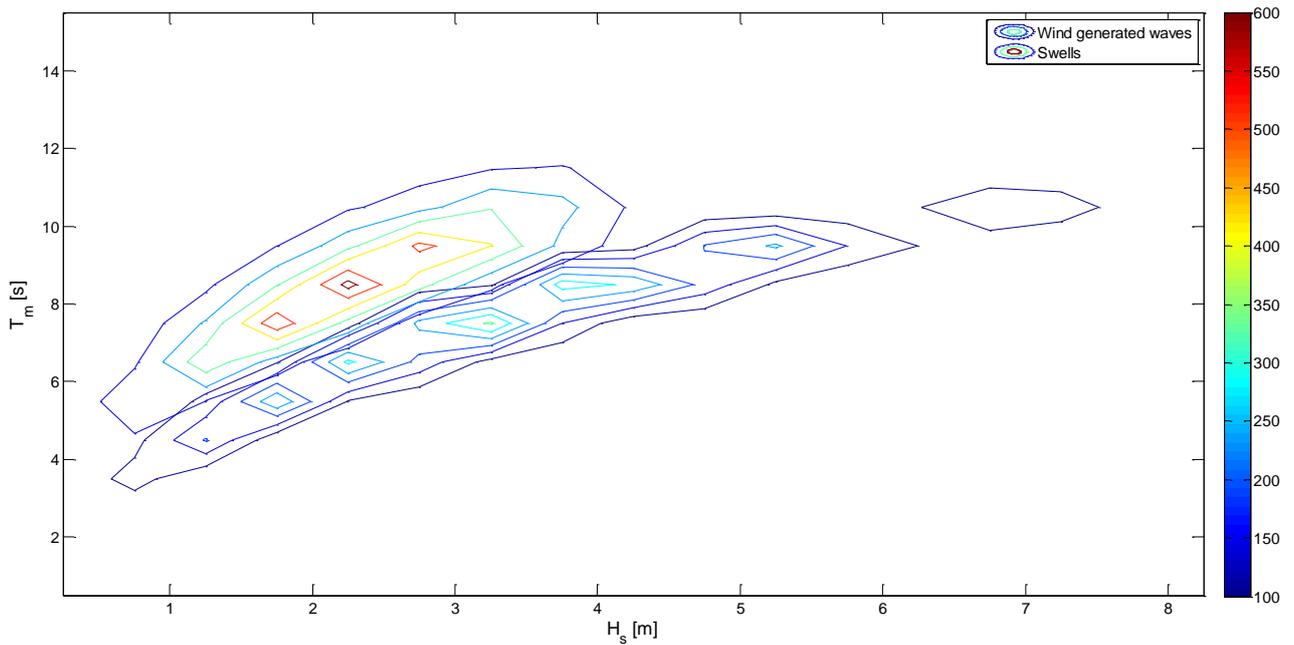
Globalmente l'impianto è in grado di produrre una quantità di **energia media per chilometro** di struttura di **9657 MWh/yr/km**.

Tm [s]	Hs [m] sottocosta - punto a profondità 30m s.l.m.m.																
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7-0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5
0 - 1	10.9873	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 - 2	36.0473	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 - 3	20.2434	0.06514	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 - 4	5.44395	7.518	0.06856	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 - 5	0.79191	2.63284	4.55605	0.11313	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 - 6	0.06171	0.16798	1.46383	2.98594	0.35653	0.01714	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 - 7	0.00343	0.024	0.0857	0.45938	1.6421	0.56565	0.0857	0.00343	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7 - 8	0	0	0.00343	0.02057	0.11999	0.7782	0.80905	0.19541	0.01371	0	0	0	0	0	0	0	0
8 - 9	0	0	0	0	0.00343	0.024	0.09256	0.47309	0.32568	0.14398	0.03428	0	0	0	0	0	0
9 - 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03428	0.14741	0.16455	0.06514	0.02743	0.01028	0	0	0
10 - 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00686	0.024	0.04114	0.03085	0.00686	0.01028
11 - 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00343	0
12 - 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13 - 14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14 - 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15 - 16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOT	73.58	10.41	6.18	3.58	2.12	1.38	0.99	0.67	0.37	0.29	0.20	0.07	0.05	0.05	0.03	0.01	0.01

**Tabella 1.** Frequenze di accadimento di stati di mare rappresentativi di onde generate dal vento.

Tm [s]	Hs [m] sottocosta - punto a profondità 30m s.l.m.m.																
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7-0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5
0 - 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 - 2	0.01714	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 - 3	6.77408	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 - 4	14.772	0.34967	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 - 5	11.5324	6.75351	0.14056	0.00343	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 - 6	2.2386	12.5643	2.36887	0.0857	0.00343	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 - 7	0.28454	4.67947	7.62427	1.54268	0.09599	0.01371	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7 - 8	0.04114	0.93589	3.75386	5.21769	1.42269	0.12341	0.03771	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8 - 9	0	0.23312	1.11759	2.31402	3.05108	1.09016	0.26397	0.03428	0.00686	0	0	0	0	0	0	0	0
9 - 10	0	0.07885	0.45595	0.69592	1.14158	1.51868	0.83648	0.26397	0.05485	0.024	0.00686	0	0	0	0	0	0
10 - 11	0	0.04457	0.18169	0.34282	0.32568	0.41138	0.54508	0.32911	0.08913	0.03085	0.02057	0.01028	0	0	0	0	0
11 - 12	0	0	0.05485	0.16112	0.18169	0.12341	0.1577	0.1337	0.06514	0.04457	0.01714	0.00343	0.00343	0.00343	0	0	0
12 - 13	0	0	0.00343	0.01714	0.04799	0.00686	0.01028	0.024	0.024	0.00686	0.01371	0	0	0	0	0	0
13 - 14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14 - 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15 - 16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOT	35.66	25.64	15.70	10.38	6.27	3.29	1.85	0.79	0.24	0.11	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

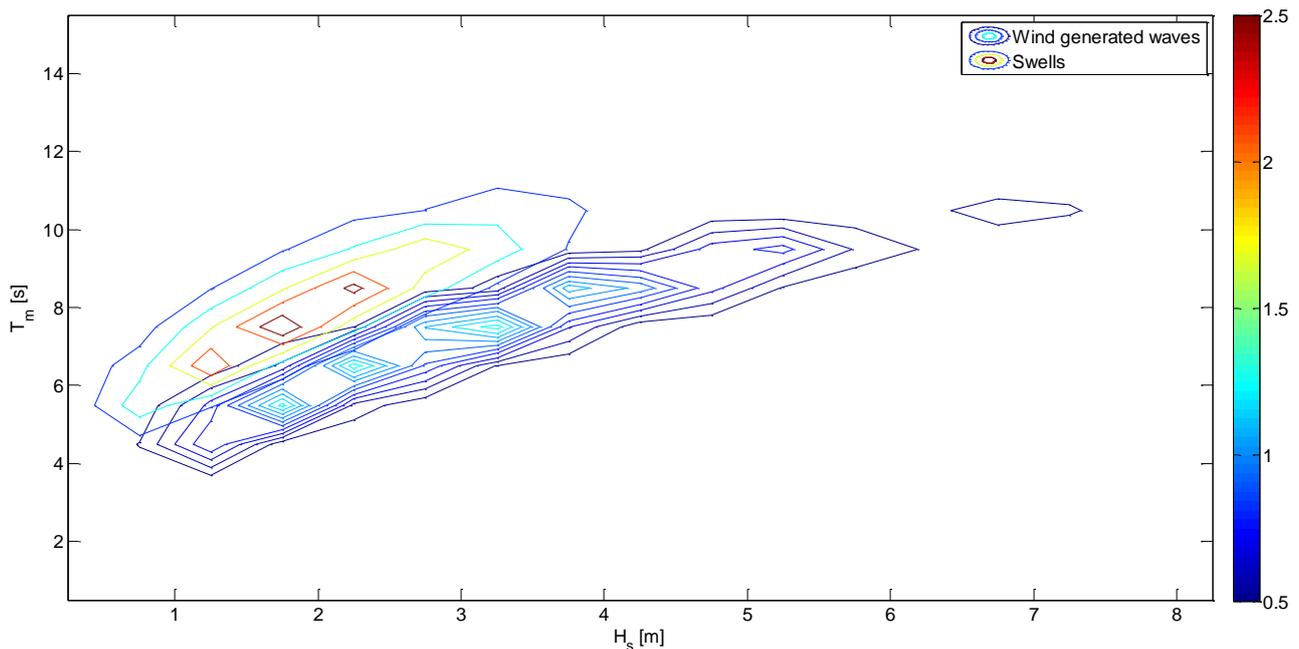
**Tabella 2.** Frequenze di accadimento di stati di mare rappresentativi di onde di mare lungo.



**Figura 3.** Curve di livello della potenza media annuale in MW/yr/m.

<i>Affondamento dell'imbocco</i>	$h=2\text{m}$
<i>Altezza della camera rispetto al livello di medio mare</i>	$\zeta_0=9.0\text{m}$
<i>Larghezza del condotto esterno</i>	$s'=2.5\text{m}$
<i>Larghezza della colonna oscillante</i>	$s''=5\text{m}$
<i>Profondità della singola cella</i>	$b=4\text{m}$
<i>Finestra tra condotto e camera</i>	$s=2\text{m}$
<i>Lunghezza del condotto verticale</i>	$l'=6\text{m}$
<i>Diametro della turbina</i>	$D=0.75\text{m}$

**Tabella 3.** Geometria dell'U-OWC.



**Figura 4.** Energia media annuale convertita per turbina in *MWh/yr*.

## II.2 Dimensionamento di una diga portuale a cassoni con incorporato impianto U-OWC per la costa Nord-Ovest della Sardegna (Capo dell'Argentiera).

Come precedentemente detto, un impianto U-OWC può essere incorporato in tradizionali dighe portuali a parete verticale affinché assolva alla funzione classica di protezione del bacino portuale, ed al contempo consenta la produzione di energia elettrica dall'energia ondosa incidente.

Per l'impianto progettato nella sezione II.1 per la località di Capo dell'Argentiera, è stato opportunamente dimensionato un cassone in cemento armato in cui l'U-OWC possa essere incorporato. Il dimensionamento del cassone U-OWC è stato effettuato affinché sia verificata la sua stabilità globale sotto l'azione degli eventi estremi nella località di interesse. Allo scopo si è fatto riferimento ai risultati del report RdS/2013/137, e si è assunto a base di progetto uno stato di mare con altezza significativa pari a 11.5 m, che è quella con periodo di ritorno pari a 50 anni nella località (punto 30 del predetto report).

Si assume che la profondità del fondale su cui verrà realizzata la diga sia di 30 m, e che la profondità di imbasamento del cassone sia di 20 m. Inoltre, la massima quota del cassone sopra il l.m.m. è stata posta pari a 8 m.

È stato, quindi, applicato il modello di Goda (1974, 1999) per il calcolo delle azioni instabilizzanti agenti sulla struttura durante la fase di cresta d'onda. La metodologia è la medesima di quella utilizzata nel report RdS/2012/231, nel quale è stato effettuato uno studio per il dimensionamento di massima di impianti U-OWC. Si rimanda a tale report per tutte le specifiche.

Si ricorda che con il modello di Goda, l'onda di progetto è definita come:

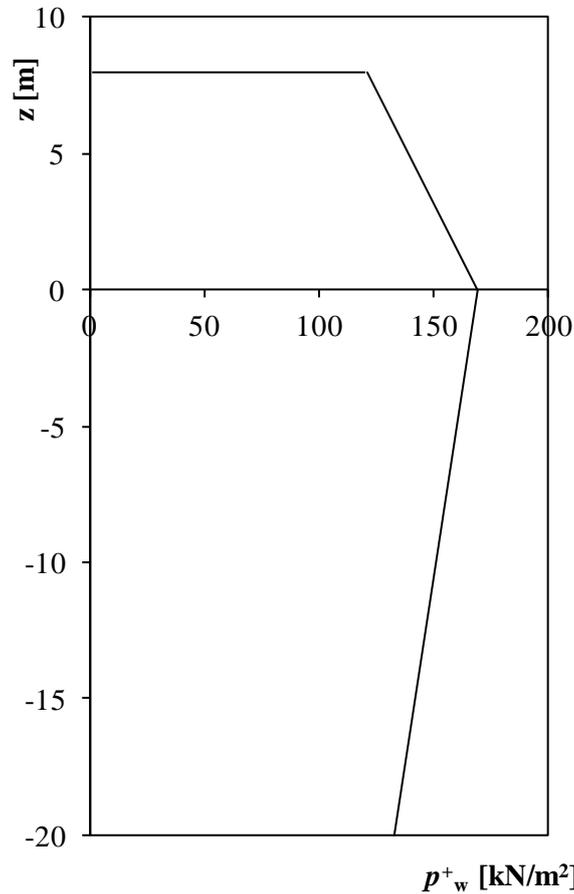
$$H = 1.8H_s \text{ e } T_h = 0.92T_p$$

essendo  $H_s$  l'altezza significativa di progetto alla profondità di imbasamento della struttura,  $T_h$  il periodo delle onde più alte (Boccotti 2000) e  $T_p$  il periodo di picco di progetto (l'espressione di sopra che lega  $T_h$  e  $T_p$  è valida per spettro JONSWAP medio).

La distribuzione delle pressioni dovute all'onda agenti sulla struttura durante la fase di cresta d'onda è riportata in Figura 5. Il valore della sottospinta prodotta dall'onda, dal lato battuto dall'onda è uguale a 120.6 kN/m<sup>2</sup>.

È stato quindi effettuato il dimensionamento del cassone U-OWC per la località di Capo dell'Argentiera, che soddisfa con adeguati coefficienti di sicurezza alle verifiche di stabilità globale (*Istruzioni Tecniche per la*

Progettazione delle Dighe Marittime emanate dal Consiglio Superiore LL.PP., 1995). La sezione e la pianta sono riportate in Allegato. Tale cassone U-OWC ha un coefficiente a scorrimento e a ribaltamento pari, rispettivamente, a 1.45 e a 1.54. Le forze e i momenti, stabilizzanti e in stabilizzanti, sono riportati nelle Tabella 4.



**Figura 5.** Distribuzione delle pressioni dovute all'onda durante la fase di cresta secondo lo schema di Goda nella località in esame di Capo dell'Argentiera.

**Tabella 4** Forze e momenti stabilizzanti e instabilizzanti per la configurazione del cassone U-OWC di Figura A.1 e A.2 dimensionato per la località di Capo dell'Argentiera (Sardegna Nord-Ovest).

**COMPUTO DEI PESI e dei MOMENTI STABILIZZANTI in Fase di Cresta d'Onda**

1	Peso Alleggerito Piastrone di base in c.a.	t	1,696.97
2	Peso Alleggerito Mensolotti di base in c.a.	t	130.54
3	Peso Complessivo n.15 Cella Cassone Tradizionale riempite con Materiale avente peso specif. 2.2t/m <sup>3</sup>	t	27,838.86
4	Peso Complessivo Setti Trasversali e Longitudinali in c.a.	t	7,316.42
5	Peso Complessivo Setti di raccordo in c.a.	t	38.79
6	Peso Copertura in c.a. Camera di Assorbimento	t	279.81
7	Peso Sovrastruttura in c.a. sopra l.m.m.	t	5,531.50
9	Peso magrone in cemento nella parte attiva	t	4,162.16
<b>PESO TOTALE</b>			<b>t 46,995.04</b>

1	Momento Complessivo Setti Trasversali e Longitudinali in c.a.	tm	166,897.32
2	Momento Mensolotti	tm	2,839.16
3	Momento Complessivo n.15 Cella Cassone Tradizionale riempite con Materiale avente peso specif. 2.2t/m <sup>3</sup>	tm	271,428.90
4	Momento magrone nella parte modificata	tm	133,966.72
5	Momento sovrastruttura in c.a. sopra l.m.m.	tm	102,001.60
6	Momento alleggerito piastrone di base	tm	35,636.33
<b>MOMENTO STABILIZZANTE TOTALE</b>			<b>tm 712,770.03</b>

**COMPUTO DELLE FORZE e dei MOMENTI INSTABILIZZANTI in Fase di Cresta d'Onda**

1	Forza prodotta dall'onda durante la fase di cresta	t	15,727.62
2	Sottospinta prodotta dall'onda durante la fase di cresta	t	8,883.85
3	Momento della forza prodotta dalla cresta d'onda	tm	222,006.08
4	Momento della sottospinta prodotta dalla cresta d'onda	tm	239,863.84

### II.3 Studio di equilibrio al galleggiamento durante la fase di trasporto per un cassone di tipo U-OWC.

Considerando un corpo galleggiante in acqua, questo si trova nello stato di quiete quando l'angolo di rollio è nullo (Figura 6a). A tal proposito si evidenzia che nel caso di un corpo galleggiante, questo è soggetto a una condizione di equilibrio indifferente rispetto alle traslazioni orizzontali (ovvero secondo gli assi x-x e y-y essendo, l'asse x, l'asse trasversale al corpo e l'asse y quello longitudinale) e rispetto alla rotazione attorno all'asse verticale z-z. E' sempre stabile rispetto alla traslazione verticale secondo z-z. Per quanto concerne, invece, la rotazione attorno agli assi orizzontali, si ha che una rotazione attorno all'asse y-y determina un movimento di rollio; invece, rispetto all'asse x-x un movimento di beccheggio. La condizione di instabilità del corpo è maggiore rispetto alla prima condizione (quella di rollio) e, quindi, rispetto a questa si cerca la condizione di equilibrio.

Nella condizione di quiete (Figura 6a), le forze in gioco sono la forza di gravità e la forza di galleggiamento (o spinta idrostatica), regolata dal Principio di Archimede. La forza di gravità viene rappresentata in Figura dal vettore  $\vec{a}_g$  ed ha modulo  $mg$ , in cui  $m$  è il dislocamento del corpo galleggiante (ovvero è la sua massa

e del suo contenuto). Tale forza è applicata nel baricentro G ed è diretta verticalmente, verso il basso. Il baricentro (o centro di massa) è un punto fisso, proprio della geometria del corpo, quindi non cambia posizione a seconda dell'angolo di rollio.

Le spinte di galleggiamento agiscono su tutta la carena (che è la parte di scafo immersa in acqua), ma si può considerare la loro risultante  $\vec{s}$  (spinta idrostatica) applicata in un unico punto C denominato centro di carena, o centro di spinta, il quale varia di posizione a seconda della porzione di imbarcazione immersa in acqua, e dunque a seconda dell'angolo di rollio, indicato con  $\alpha$ . Il vettore  $\vec{s}$  agisce verso l'alto, lungo la direzione perpendicolare alla linea d'acqua (o linea di galleggiamento) e, per il Principio di Archimede, in condizione di quiete, ha modulo  $mg$  come la forza di gravità. Dal momento che, in assenza di rollio, i vettori  $\vec{a}_g$  e  $\vec{s}$  agiscono, in verso opposto e con ugual modulo, sull'asse baricentrico longitudinale, la loro risultante è nulla.

Nel caso in cui il corpo galleggiante sia inclinato secondo un certo angolo  $\alpha$ , come in Figura 6b. Per quanto riguarda le forze in gioco, si nota che in questa situazione la loro risultante non è più nulla. La forza di gravità risulta sempre applicata al baricentro, il quale non cambia posizione rispetto al corpo, è rivolta perpendicolarmente alla linea d'acqua ed ha modulo  $mg$ . La spinta idrostatica mantiene anch'essa il verso e il modulo che possiede in condizione di quiete. Tuttavia, ora il centro di spinta si muove rispetto all'asse baricentrico longitudinale, poiché varia la porzione di scafo immersa in acqua (C si sposta dalla parte di scafo che si immerge). Esso, tuttavia, cade sempre sulla perpendicolare alla linea d'acqua passante per il punto M, che è denominato metacentro (vedi Figura 6b).

Il metacentro è un punto, fisso per angoli di rollio ridotti (inferiori a  $12^\circ$ ), situato all'intersezione tra la verticale su cui giace il vettore  $\vec{s}$ , innalzata dal centro di spinta C', e l'asse longitudinale di simmetria. Quindi si può affermare che, al variare dell'angolo di inclinazione, la linea d'azione della forza di galleggiamento ruota attorno al metacentro. Le forze di gravità e di galleggiamento, uguali in modulo e agenti lungo rette parallele, generano una coppia raddrizzante  $C_r$  che tende a riportare il natante nella situazione di equilibrio. Ciò è vero se la distanza tra il metacentro iniziale M e il centro di gravità, che si definisce altezza metacentrica, è maggiore di zero, perché si ha una condizione di equilibrio stabile. Quando, invece, tale distanza è negativa si verifica la condizione di instabilità.

Se l'angolo di inclinazione eccede i  $12^\circ$  circa, il metacentro reale si allontana dal punto M di Figura 6b, essendo il centro il centro di rotazione istantaneo del corpo. I raggi di curvatura relativi ai centri di carena sono detti raggi metacentrici.

Nel caso di piccoli angoli di rotazione (inferiore a  $12^\circ$ ), il raggio metacentrico,  $r$ , è pari alla distanza tra il punto M e il punto C di Figura 6b. E indicando con  $a$  la distanza tra il punto G e il punto C,  $r-a$  è detta distanza metacentrica.

Il valore numerico dei raggi metacentrici è fornito dal seguente rapporto tra il momento d'inerzia  $J_0$  della figura di galleggiamento rispetto all'asse d'inclinazione di traccia 0 e il volume di carena  $V_c$ :

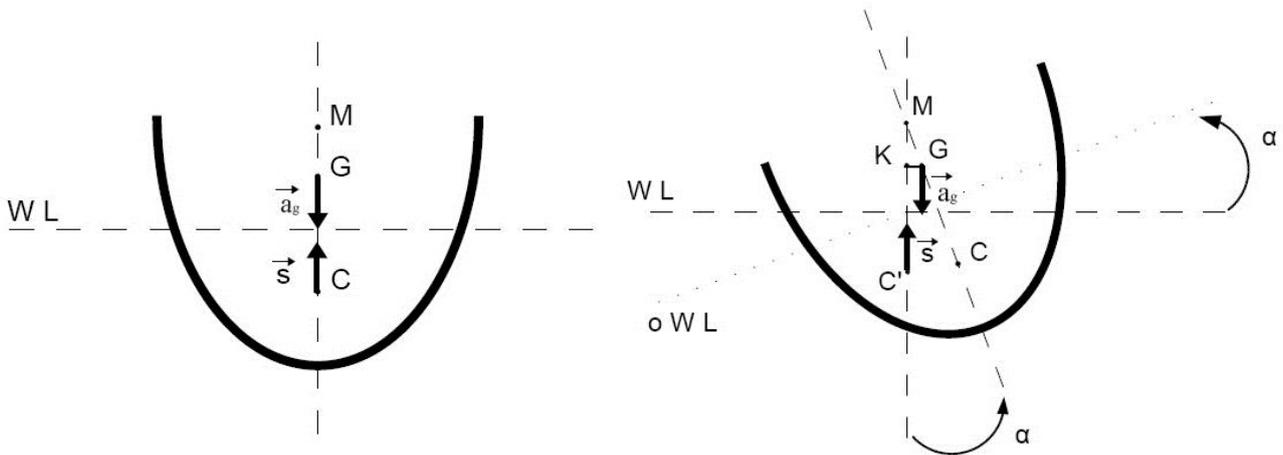
$$r = \frac{J_0}{V_c}.$$

Per quanto concerne i cassoni in cemento armato, questi posseggono nella configurazione tradizionale, un piano verticale di simmetria normale all'asse di inclinazione, per cui i centri G e C restano nello stesso piano verticale garantendo l'equilibrio nella condizione di quiete.

I cassoni in cemento armato vengono generalmente realizzati in appositi bacini di carenaggio e poi trasportati fino al luogo di realizzazione della diga. Assume, quindi, un aspetto fondamentale lo studio della loro stabilità rispetto ai movimenti di beccheggio e di rollio durante la fase di trasporto. Considerando le oscillazioni trasversali di rollio, la condizione di stabilità del cassone galleggiante è garantita quando il periodo proprio di oscillazione del galleggiante è quanto più differente da quello delle onde incidenti. Il periodo proprio della struttura galleggiante, con riferimento alla condizione di rollio, è pari a

$$T = \frac{2\pi J}{W(r-a)},$$

in cui  $J$  è il momento di inerzia e  $(r-a)$  è l'altezza metacentrica, che sono calcolati rispetto all'asse di inclinazione orizzontale longitudinale. Nel caso di trasporto, risulta fondamentale considerare anche la configurazione di equilibrio rispetto alla condizione di beccheggio; in questo caso le predette quantità  $J$  e  $(r-a)$  sono calcolate rispetto all'asse di inclinazione orizzontale trasversale.



**Figura 6.** (a) (figura di sinistra) Corpo galleggiante in quiete: è evidenziato l'asse longitudinale di simmetria e i vettori  $\vec{a}_g$  e  $\vec{s}$  hanno risultante nulla. (b) (figura di destra) Corpo galleggiante inclinato di un angolo  $\alpha$  rispetto al l.m.m.: le forze agenti  $\vec{a}_g$  e  $\vec{s}$ , in questo caso, danno luogo ad una coppia che tende a raddrizzare il corpo.

### III. *Impianto sperimentale con modello in scala di U-OWC.*

Il dispositivo REWEC3 sarà oggetto di test di laboratorio presso il Natural Ocean Engineering Laboratory ([www.noel.unirc.it](http://www.noel.unirc.it)) dell'Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria (Figura 5).

A tal riguardo, si noti che presso il NOEL è in fase di allestimento un impianto con un cassone REWEC3, finanziato nell'ambito di due progetti: il progetto 'Energia dal mare', finanziato a Wavenergy.it s.r.l. dal Polo di Innovazione NET (Crotone) ed il Poseidone, finanziato dal Ministero dell'Ambiente ad un raggruppamento che comprende le aziende Faggiolati Pumps S.p.A. e Wavenergy.it s.r.l., l'Università Mediterranea di Reggio Calabria e l'Università La Sapienza di Roma.

Per chiarire il ruolo di ENEA in questa fase ed esplicitare quali saranno le attività finanziate, si illustrerà l'attività sperimentale sia per i progetti 'Energia da mare' e Poseidone, che per l'attività ENEA. Tale specifica è utile soprattutto alla luce delle future attività, che potranno essere allestite in collaborazione con ENEA.

#### II.4 *Caratteristiche di dettaglio dell'attività sperimentale del progetto 'Energia dal Mare' e del progetto Poseidone.*

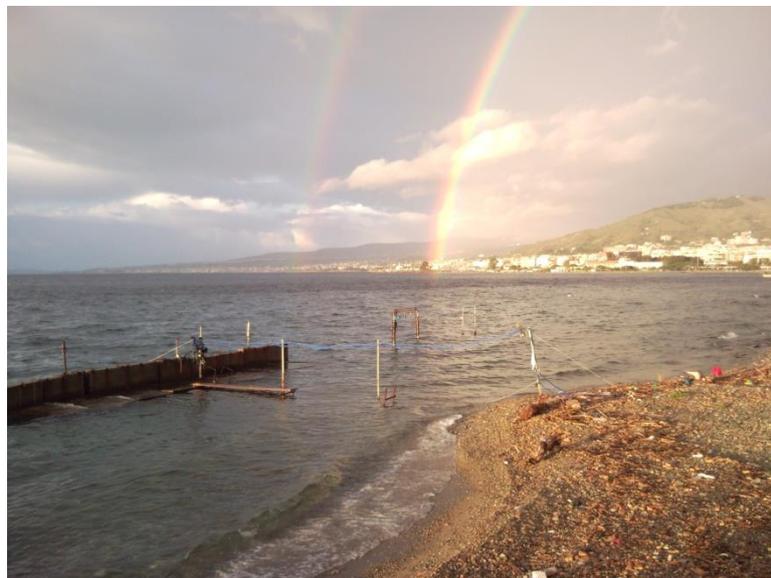
L'obiettivo dell'attività finanziata all'Università Mediterranea nell'ambito del progetto Poseidone (nell'ambito delle attività del raggruppamento sopra descritto) e del progetto 'Energia dal Mare' è duplice: verificare la bontà dei modelli idrodinamici teorici proposti in letteratura (Boccotti, 2007a; Malara and Arena, 2013); valutare la potenza media convertita da un impianto reale. Si noti come il primo punto sia stato precedentemente affrontato da Boccotti et al. (2007). Tuttavia, essi lavorarono con un impianto dalle caratteristiche geometriche differenti. La novità introdotta da questo nuovo test risiede nella possibilità di lavorare con potenze, dell'ordine del chilowatt, precedentemente non raggiungibili.

Il progetto prevede poi l'installazione di una turbina di Wells, realizzata nell'ambito del progetto Poseidone. Il costo dell'impianto (turbina esclusa), comprensivo della relativa strumentazione, è di circa 250000€ ed è totalmente finanziato dalla Mediterranea, dal progetto 'Energia dal Mare' (progetto NET) e dai partner coinvolti nell'ambito del progetto Poseidone (si veda II.5 nota conclusiva).

Le dimensioni del modello sono illustrate in Figura 6. Esso è costituito da un'anima in cemento armato con sezione a T rovescia ubicata alla quota di 2m, la cui stabilità è garantita tramite dei massi posti sulla mensola lato costa. La camera di assorbimento è realizzata mediante una struttura scatolare in acciaio posta sulla mensola lato mare e opportunamente solidarizzata all'anima. La camera di assorbimento è unica, per una lunghezza globale di 6.6m, con un'altezza di 1.9m sul livello di medio mare. L'affondamento dell'imboccatura è di 0.4m. La larghezza del condotto e della camera sono, rispettivamente, di 0.5m e 1m. In cima alla camera di assorbimento è previsto l'alloggiamento di una turbina di Wells. Essa è connessa alla camera tramite un foro avente diametro di 0.4m. Inoltre, è sostenuta tramite apposite strutture di sostegno al di sopra dei massi a tergo della camera.

Le immagini della struttura e del cassone metallico dedicato al ruolo di camera di assorbimento sono mostrate in Figura 7. Si può osservare come la struttura di sostegno sia dotata di setti, nei quali verranno posti i massi aventi funzione stabilizzante. Inoltre, nella vista lato mare (pannello in alto a destra), si possono notare gli elementi di ancoraggio camera di assorbimento – struttura. La camera di assorbimento è mostrata nel pannello inferiore della Figura 7. A tal proposito, è da notare l'assenza della porzione superiore della camera. Quest'ultima sarà saldata in un secondo momento.

Le dimensioni adottate sono state scelte alla luce dei tipici stati di mare registrati presso il laboratorio. Infatti, l'altezza significativa ed il periodo di picco oscillano, tipicamente, nel range (0.2m,0.8m) – (1.8s, 2.9s), con variazioni del livello di medio mare di  $\pm 0.15$ m. A tal riguardo, l'unicità del laboratorio risiede nella possibilità di lavorare con onde che sono ottimi modelli in scala di onde oceaniche o del Mediterraneo. Tuttavia, è utile sottolineare che l'impianto in fase di test non è un modello in scala, cioè i risultati in termini di produzione energetica non sono scalabili a impianti dalle dimensioni maggiori. Esso è, semplicemente, un impianto dalle dimensioni contenute. Inoltre, si sottolinea che, essendo le onde generate naturalmente dal vento, è 'implicitamente' possibile condurre analisi a differenti profondità relative e per differenti dimensioni del cassone, essendo variabili le lunghezze delle onde incidenti.



**Figura 5.** Laboratorio NOEL dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria: ubicazione ed immagini durante le attività sperimentali del 2005.



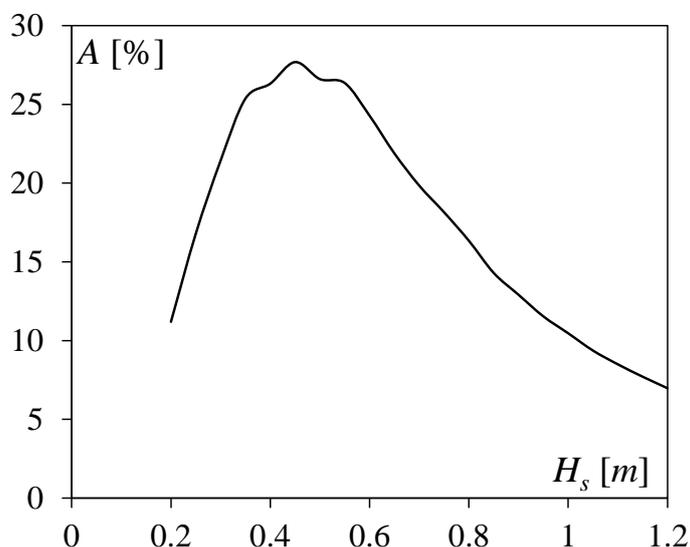


**Figura 7.** Struttura di sostegno del U-OWC (in alto), vista lato mare (destra) e lato terra (sinistra), e camera di assorbimento metallica (in basso).

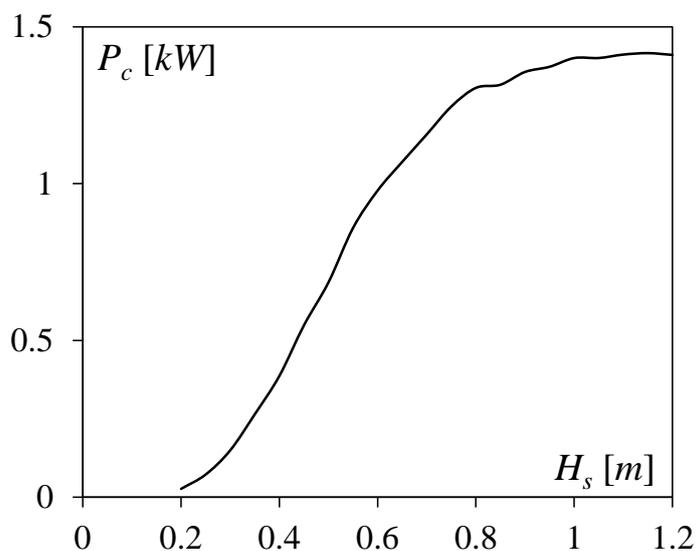
Preliminarmente, le stime energetiche sono state condotte tramite simulazioni Monte Carlo basate sull'integrazione dell'equazione del moto dell'impianto. L'input del sistema, ovvero le fluttuazioni di pressione all'imboccatura, sono state generate tramite il metodo spettrale, utilizzando l'algoritmo della Trasformata Veloce di Fourier, noto lo spettro di frequenza delle fluttuazioni di pressione. Si è assunto uno spettro di frequenza delle onde incidenti del tipo JONSWAP medio (Hasselmann et al., 1973).

La turbina adottata è la turbina di Wells. In particolare si è utilizzata una turbina monoplana. Le caratteristiche della turbina (efficienza e caduta di pressione) sono state dedotte dai risultati sperimentali di Curran and Gato (1997). La velocità di rotazione è posta costante per fissato livello di altezza significativa. Per altezze minori o uguali a 0.35m, la velocità di rotazione è di 3000rpm; altrimenti è di 3600rpm.

Il coefficiente di conversione (potenza media convertita/potenza media incidente) stimato per varie soglie di altezza significativa è mostrato in Figura 8. Si può osservare che il massimo rendimento si ottiene per gli stati di mare aventi un'altezza significativa di 0.4m-0.6m. In termini assoluti, le potenze convertite sono rappresentate in Figura 9. I risultati delle simulazioni mostrano che l'impianto opera, a partire dalle condizioni di massimo rendimento, con potenze medie di circa 1 kW per turbina.



**Figura 8.** Coefficiente di conversione definito come il rapporto tra la potenza media convertita dall'impianto e la potenza media incidente, calcolato per soglie di altezza significativa.



**Figura 9.** Potenza media convertita dall'impianto vs altezza significativa.

Le Figure 10 e 11 mostrano alcuni risultati sperimentali attesi. In particolare, facendo riferimento alla risposta dinamica registrabile dalla strumentazione posta in mare. Sono riportati gli spezzoni di registrazioni di: superficie libera sulla parete verticale, pressione ondosa all'imboccatura, superficie libera nella camera di assorbimento, pressione dell'aria nella camera, velocità dell'aria nel condotto ospitante la turbina. Tali grandezze saranno oggetto di misurazioni in sito, fatta eccezione per la velocità dell'aria nel condotto della turbina. Quest'ultima grandezza è utile per la valutazione della potenza convertita e per monitorare il comportamento della turbina.

### *11.5 Progettazione attività sperimentali*

È stata progettata un'attività sperimentale (finanziata da ENEA in ambito PAR 2012) che potrà essere eseguita in collaborazione con ENEA con costi contenuti. Allo scopo è previsto l'uso del cassone esistente al fine di determinare nuove configurazioni di utilizzo. In particolare, sarà pianificato, a valle della già descritta attività di ricerca, una rimodulazione del cassone sperimentale con cui si perverrà alla costituzione di un U-OWC (parte attiva della struttura) dalla larghezza contenuta (circa 1/3 o 1/5 della larghezza originale), che permetterà di testare le performance dell'impianto con una camera di assorbimento ridotta. Il contributo scientifico di questa attività è da inquadrarsi nell'abito dell'ottimizzazione dei cassoni REWEC3. Essa permetterà la definizione di rigorosi criteri di ottimizzazione utili in fase di progettazione. Inoltre, si segnala che ENEA sta lavorando al completamento delle prime analisi CFD del cassone. In questo contesto, i risultati sperimentali saranno di evidente utilità al fine di testare la bontà delle elaborazioni numeriche.

Nel dettaglio, la fase di rimodulazione prevede la partizione della camera di assorbimento dell'impianto ottenuta inserendo degli opportuni setti all'interno del cassone. Tali setti possono essere inseriti all'asciutto. Infatti, la camera può essere sganciata dal proprio supporto e trasportata a riva, dove tramite opportuna strumentazione si potrà procedere all'inserimento. L'aspetto interessante di questo intervento è quello di lasciare spazio ad ulteriori sperimentazioni tramite delle configurazioni 'a finestra'. In particolare, a partire dai setti aggiuntivi saranno ricavate delle aperture di dimensioni contenute (finestre) per mettere in comunicazione la camera centrale (a cui è collegata la turbina), con le camere esterne. Anche in questo contesto saranno valutate le performance dell'impianto e individuate le migliorie/ i difetti di questa particolare soluzione progettuale.

Per quanto attiene le analisi da condurre, si farà riferimento sia alle condizioni 'ordinarie', ovvero struttura operante in stati di mare aventi grandi frequenze di accadimento, sia alle condizioni 'estreme', ovvero struttura operante in stati di mare eccezionalmente severi. A tal riguardo, l'interesse è duplice. Infatti, se il primo punto permetterà la valutazione delle performance energetiche dell'impianto (nei termini e con gli obiettivi precedentemente menzionati), l'analisi in condizioni estreme permetterà la valutazione del comportamento strutturale del cassone. Si noti che, in questo caso, le performance energetiche dell'impianto non sono oggetto di studio poiché per ragioni di sicurezza sarà necessario disattivare la turbina per evitare che gli shock indotti dalle pressioni eccessive possano comprometterne il funzionamento. L'interesse in questo contesto riguarda la stabilità strutturale del cassone. Infatti, sarà possibile, dalle registrazioni dei carichi all'imboccatura pervenire alla quantificazione delle sollecitazioni agenti.

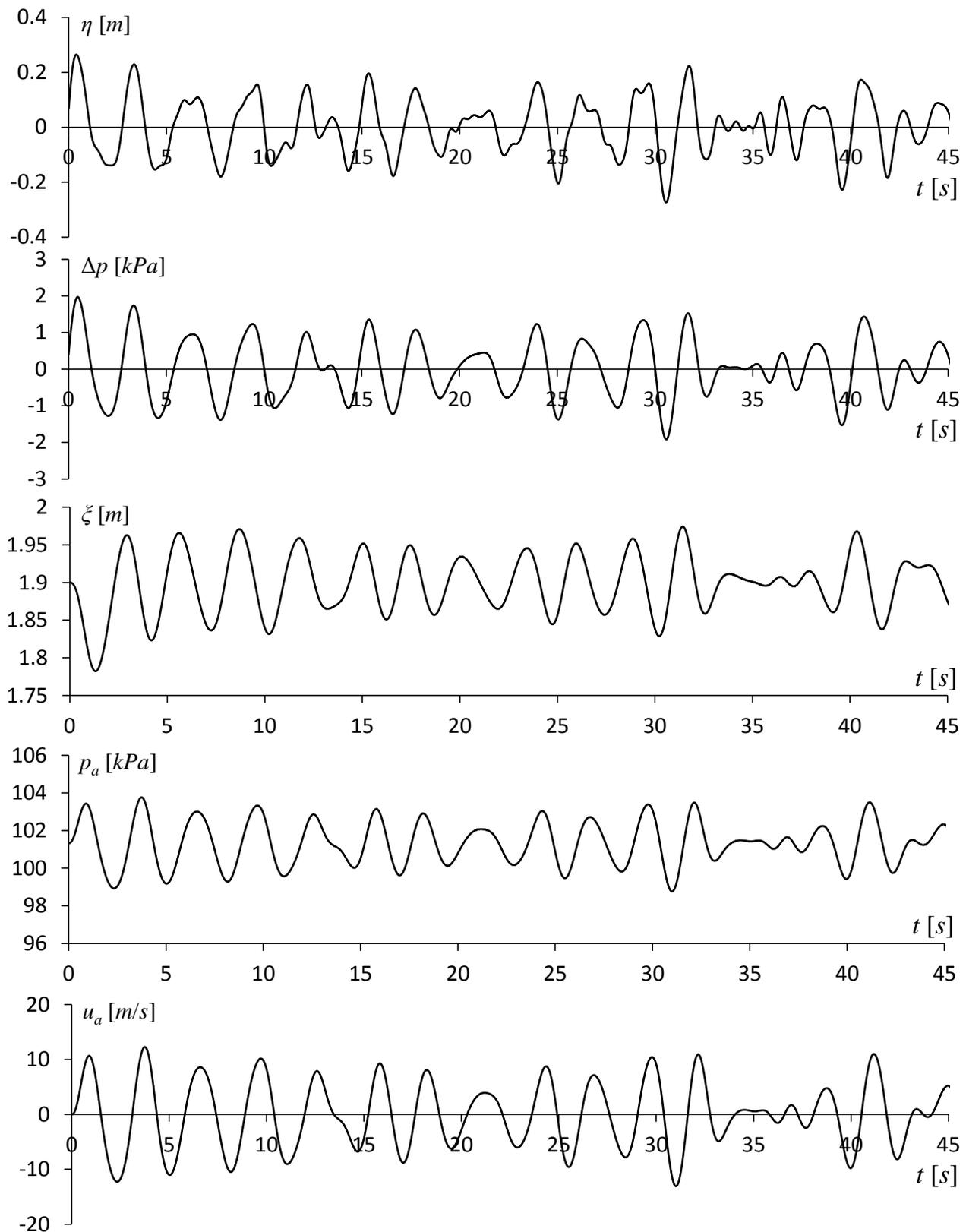
Ai fini di una preventiva valutazione delle differenze apportate dalla partizione della camera di assorbimento, si sono ricavate le risposte dell'impianto mantenendo inalterate le caratteristiche degli stati di mare delle Figure 10 e 11. I risultati sono mostrati nelle Figure 12 – 17 e si riferiscono al caso di setto ridotto. Le Figure 16 – 17 sono interessanti sotto il profilo dei carichi estremi, poiché permettono di analizzare la storia temporale delle fluttuazioni di pressione all'imboccatura dell'impianto in condizioni gravose.

La frazione di potenza convertita e la potenza convertita (in kW/turbina) sono mostrate nelle Figure 18 - 19. Ci si aspetta di registrare delle variazioni nelle capacità di assorbimento, in particolare con riferimento alla capacità dell'impianto di lavorare in condizioni di risonanza. Particolare enfasi sarà posta sulla possibilità di ottimizzare le performance della turbina anche in condizioni non ottimali regolando parametri quali la velocità di rotazione delle pale.

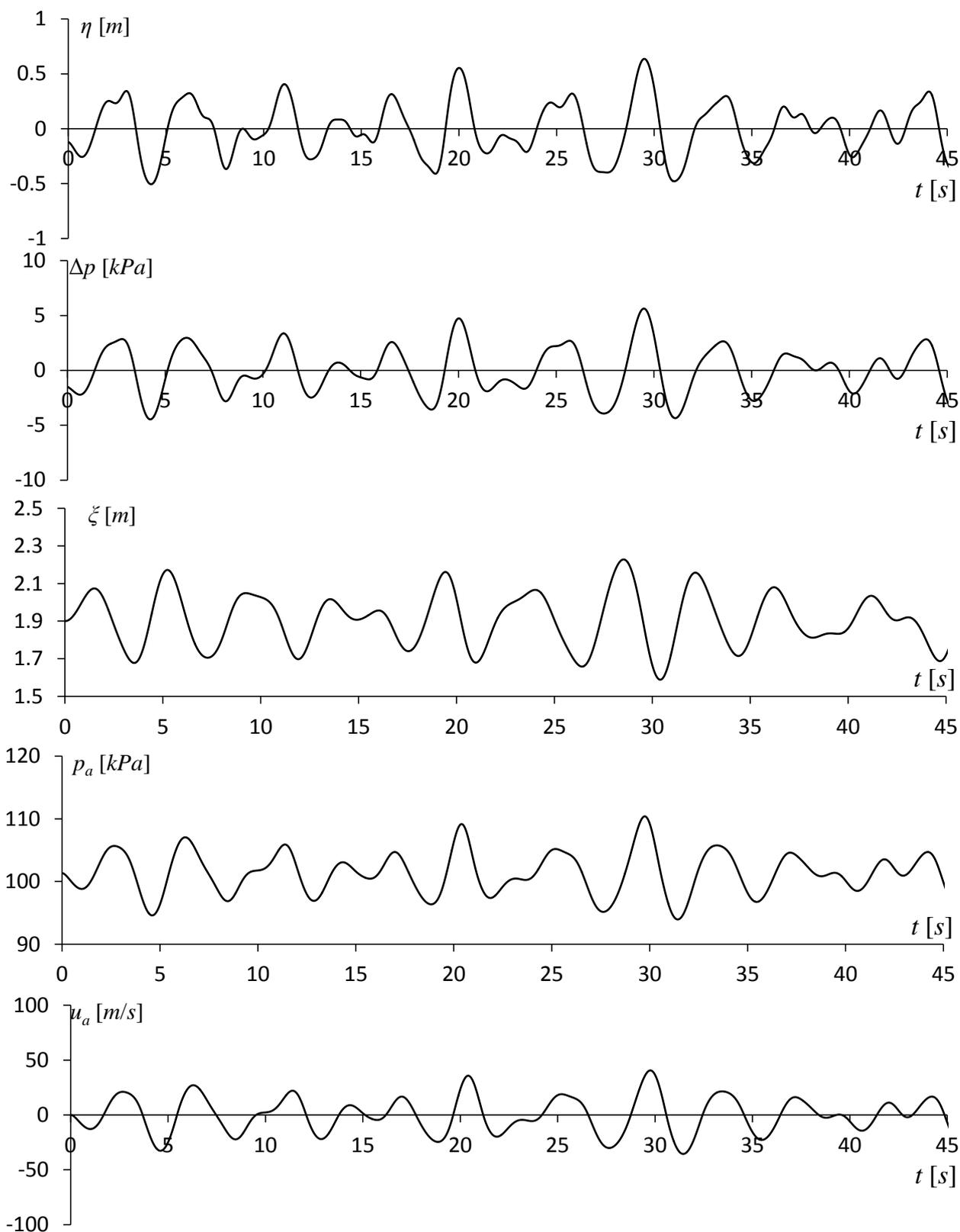
## *II.6 Nota Conclusiva*

Le attività sperimentali sono finanziate, in parte, nell'ambito dei seguenti progetti:

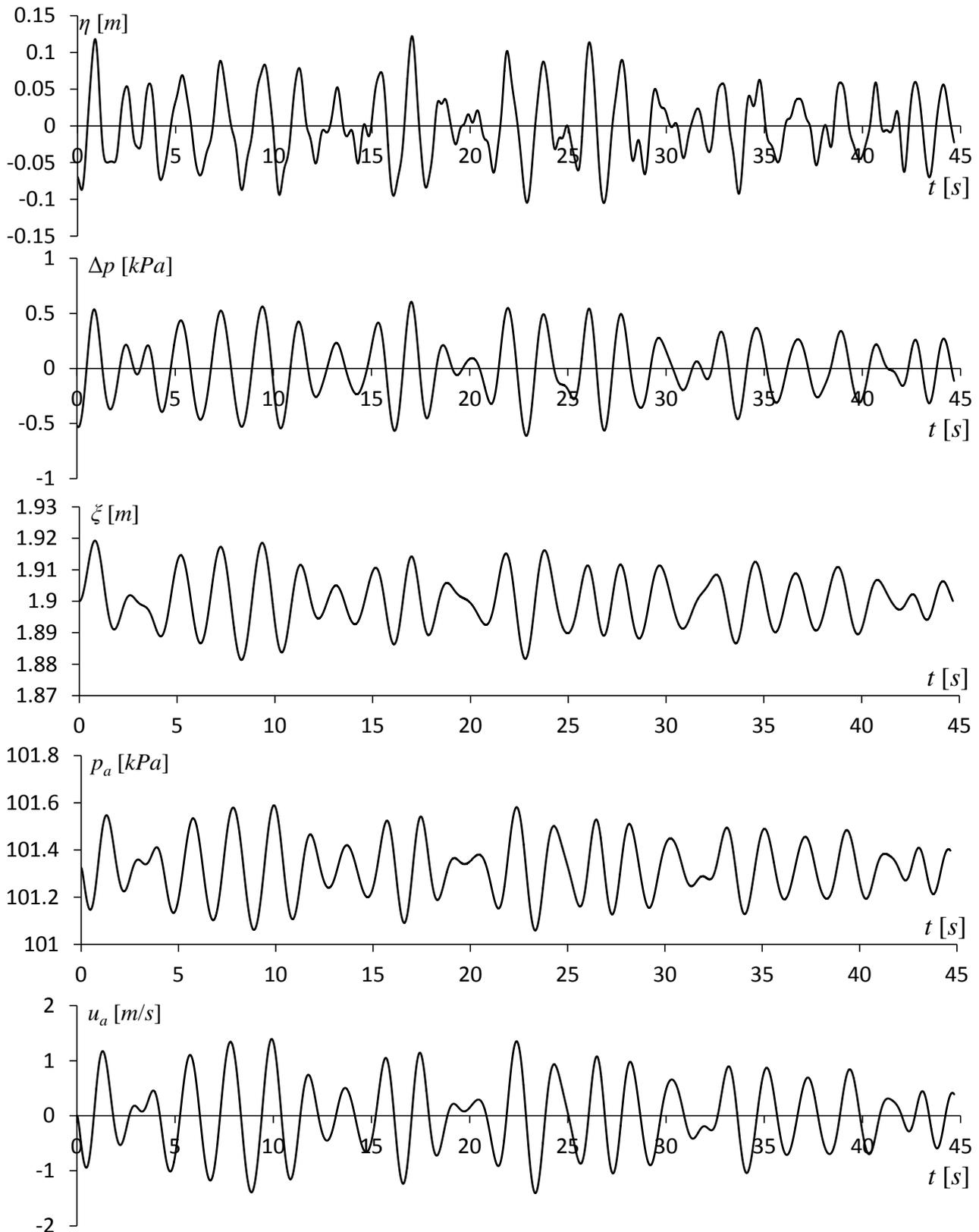
- 1) Progetto POSEIDONE, finanziato dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. In collaborazione tra Wavenergy.it s.r.l. (Spin-Off dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria), Faggiolati Pumps s.p.a., Università Mediterranea e Università La Sapienza di Roma
- 2) Dimostratore OWC, progetto 'Energia dal Mare' finanziato dal Polo di Innovazione NET Scarl, polo Energie Rinnovabili Efficienza energetica e Tecnologie per la gestione sostenibile delle risorse ambientali, nell'ambito di una convenzione con la società Wavenergy.it s.r.l.



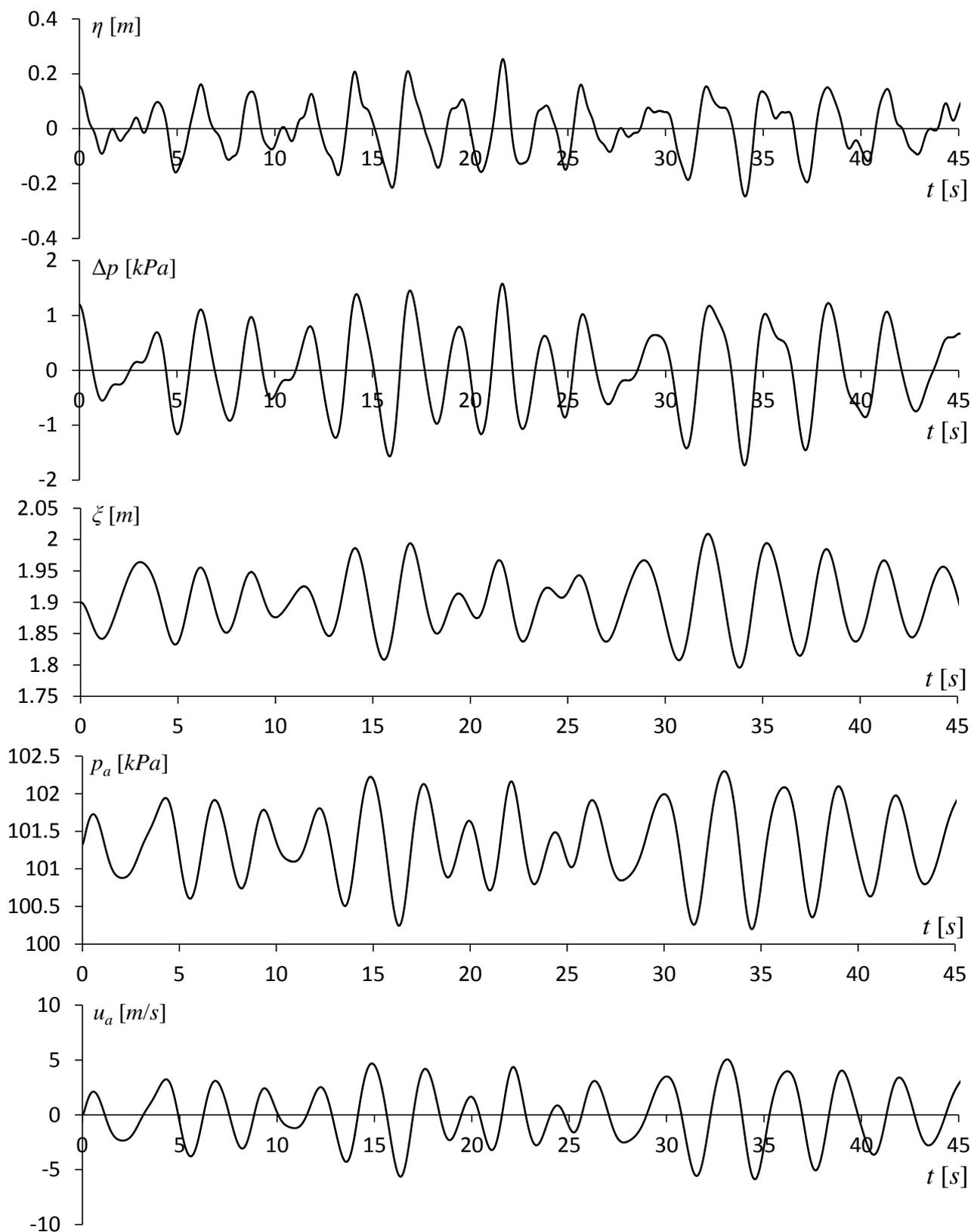
**Figura 10.** Regrazioni relative ad uno stato di mare con spettro di frequenza JONSWAP medio e altezza significativa  $H_s=0.4\text{m}$ . In particolare, dal pannello superiore si ha: superficie libera di fronte alla parete (pannello 1); fluttuazione di pressione all'imboccatura (pannello 2); superficie libera nella camera di assorbimento misurata dalla cima della camera (pannello 3); pressione nella camera d'aria (pannello 4); velocità dell'aria nel condotto ospitante la turbina (pannello 5). [Simulazioni eseguite nell'ambito del progetto POSEIDONE].



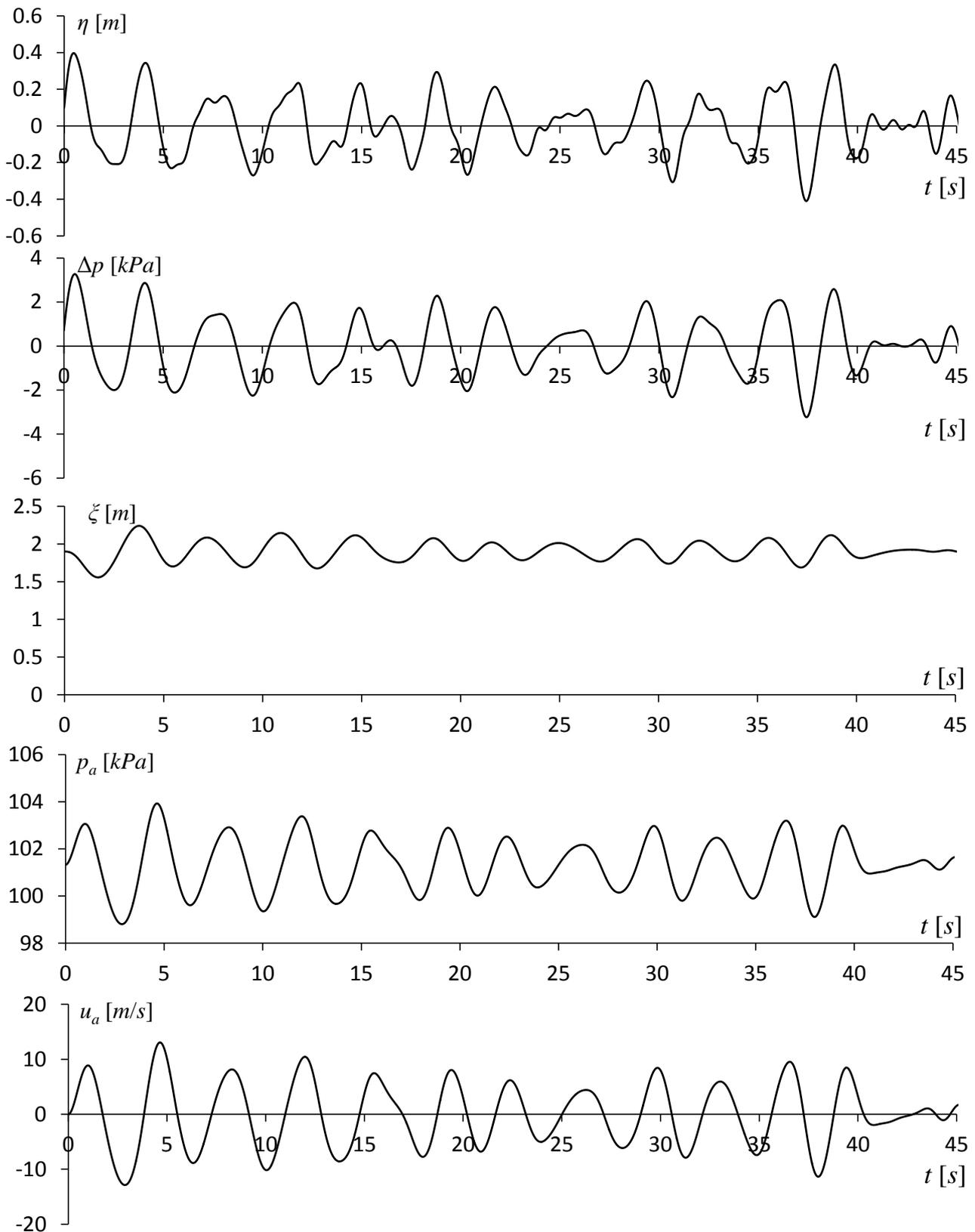
**Figura 11.** Regrazioni relative ad uno stato di mare con spettro di frequenza JONSWAP medio e altezza significativa  $H_s=1.0m$ . In particolare, dal pannello superiore si ha: superficie libera di fronte alla parete (pannello 1); fluttuazione di pressione all’imboccatura (pannello 2); superficie libera nella camera di assorbimento misurata dalla cima della camera (pannello 3); pressione nella camera d’aria (pannello 4); velocità dell’aria nel condotto ospitante la turbina (pannello 5). [Simulazioni eseguite nell’ambito del progetto POSEIDONE].



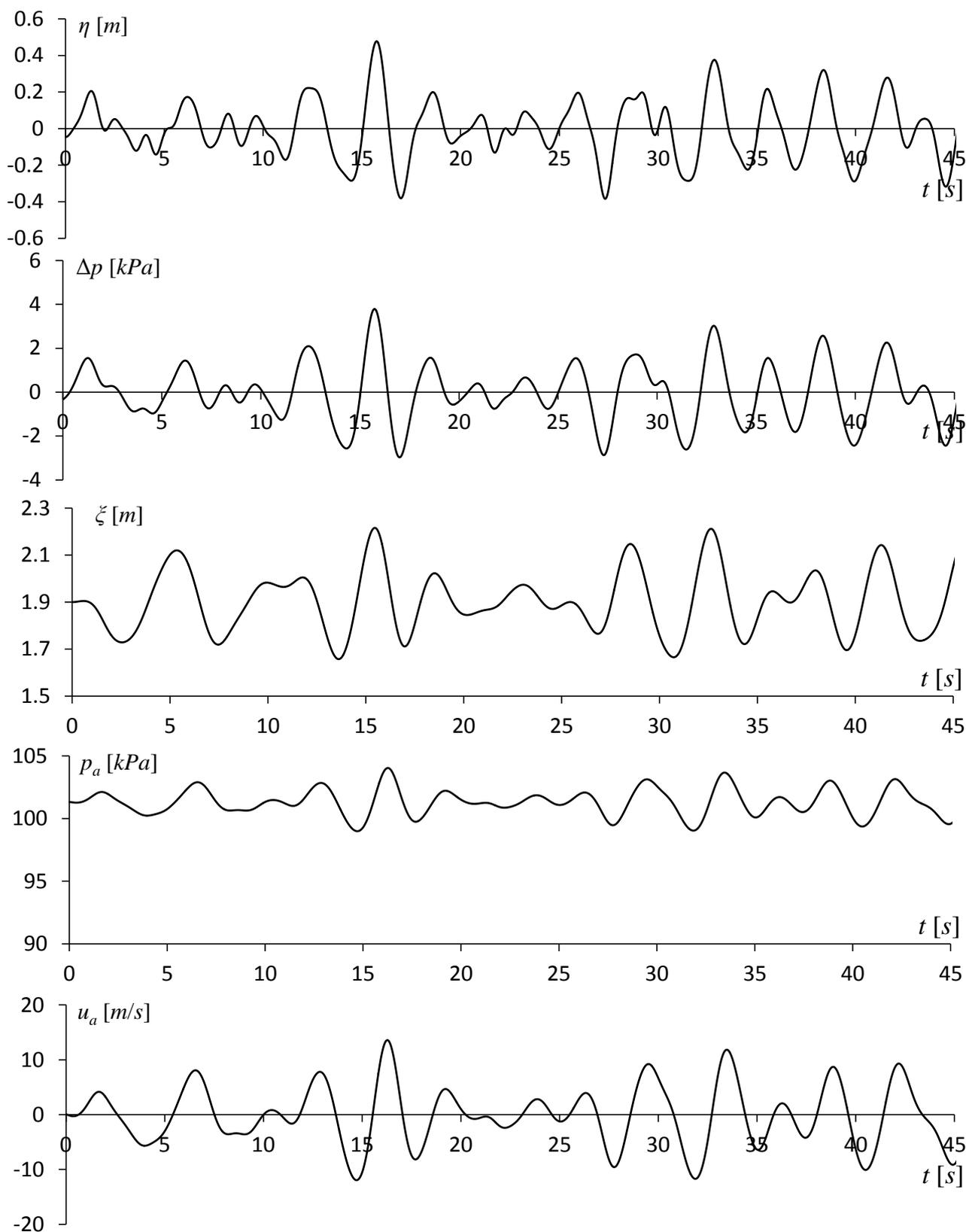
**Figura 12.** Registrazioni relative ad uno stato di mare con spettro di frequenza JONSWAP medio e altezza significativa  $H_s=0.2\text{m}$ , per REWEC3 con camera partizionata. In particolare, dal pannello superiore si ha: superficie libera di fronte alla parete (pannello 1); fluttuazione di pressione all'imboccatura (pannello 2); superficie libera nella camera di assorbimento misurata dalla cima della camera (pannello 3); pressione nella camera d'aria (pannello 4); velocità dell'aria nel condotto ospitante la turbina (pannello 5).



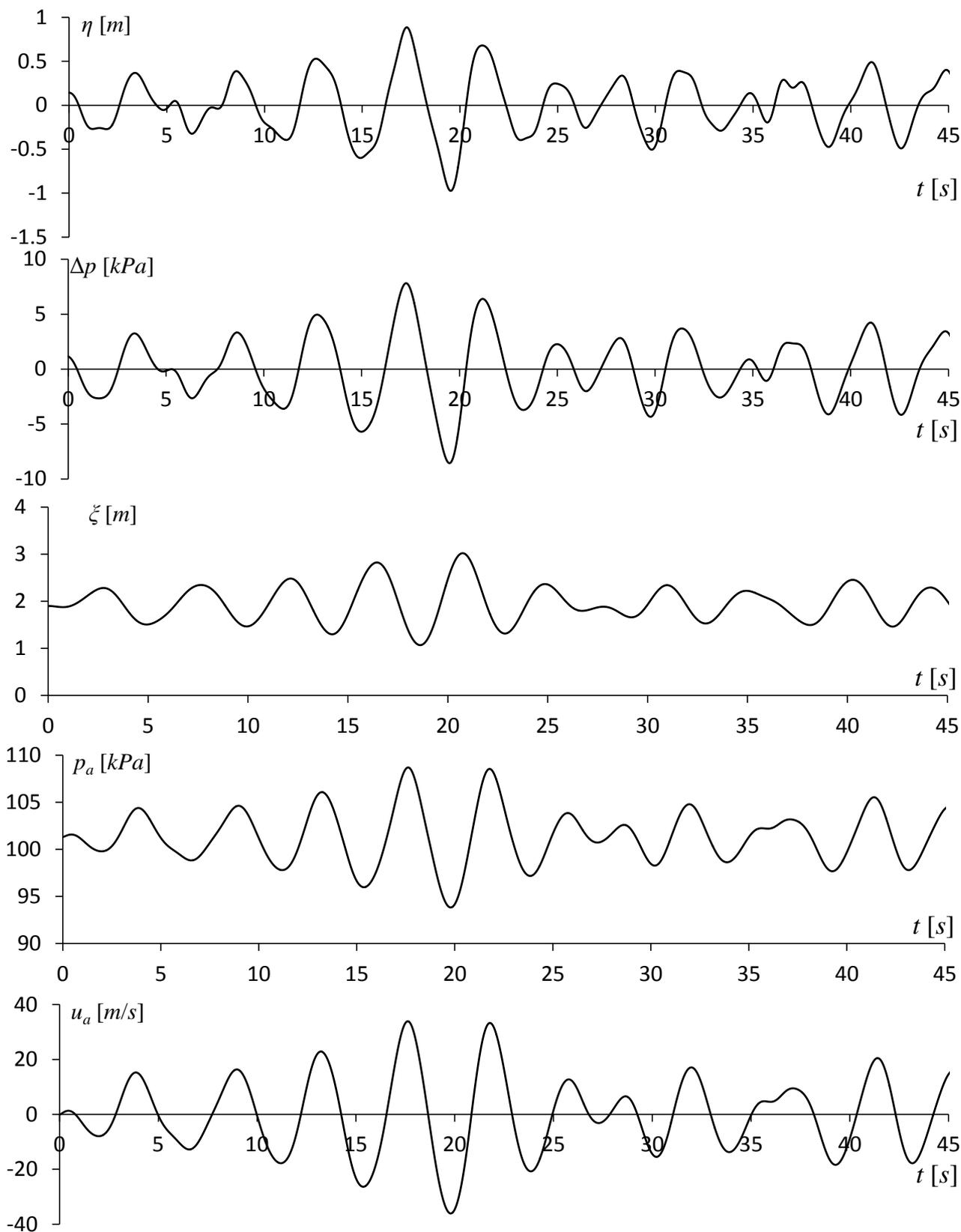
**Figura 13.** Registrazioni relative ad uno stato di mare con spettro di frequenza JONSWAP medio e altezza significativa  $H_s=0.4\text{m}$ , per REWEC3 con camera partizionata. In particolare, dal pannello superiore si ha: superficie libera di fronte alla parete (pannello 1); fluttuazione di pressione all'imboccatura (pannello 2); superficie libera nella camera di assorbimento misurata dalla cima della camera (pannello 3); pressione nella camera d'aria (pannello 4); velocità dell'aria nel condotto ospitante la turbina (pannello 5).



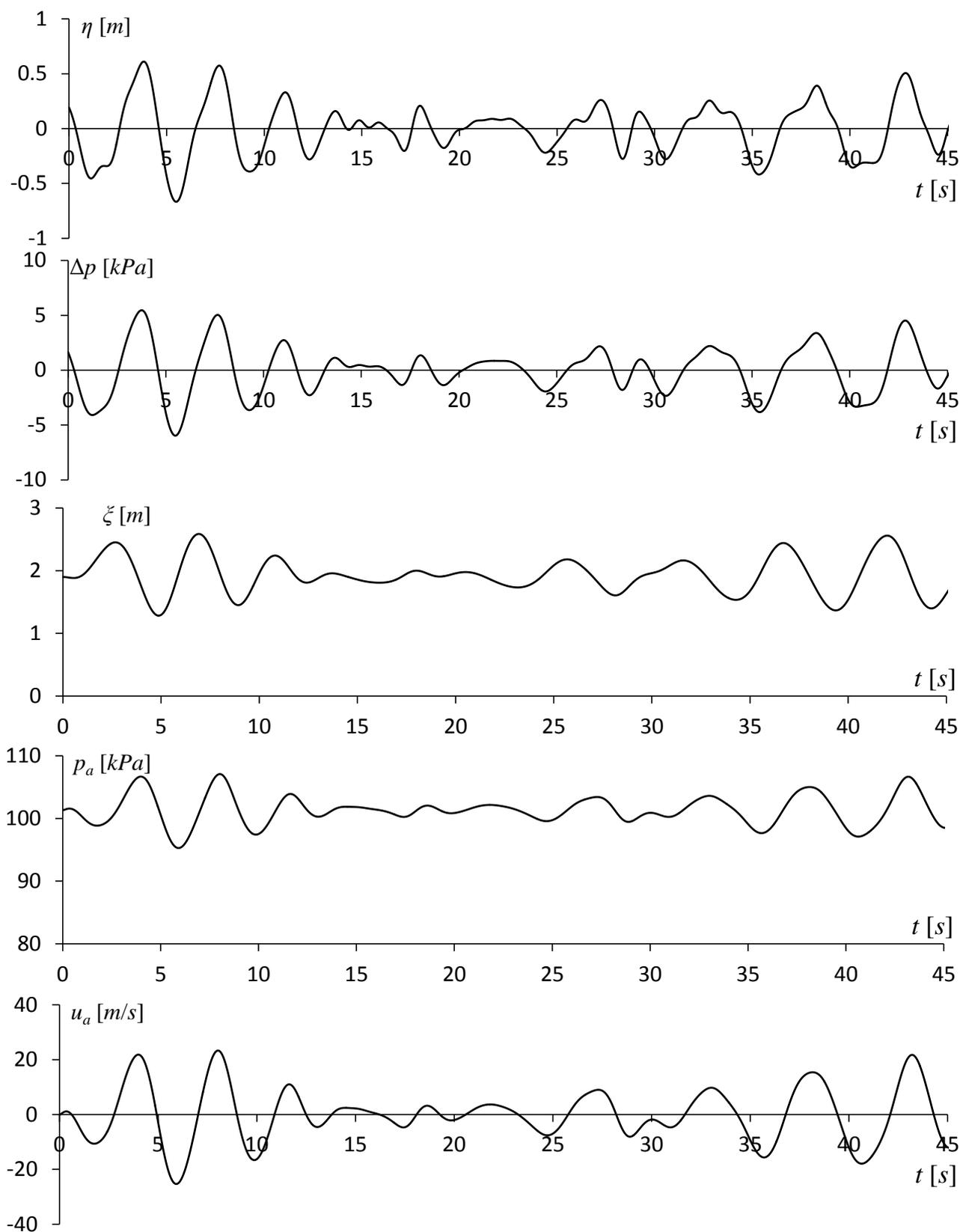
**Figura 14.** Registrazioni relative ad uno stato di mare con spettro di frequenza JONSWAP medio e altezza significativa  $H_s=0.6\text{m}$ , per REWEC3 con camera partizionata. In particolare, dal pannello superiore si ha: superficie libera di fronte alla parete (pannello 1); fluttuazione di pressione all'imboccatura (pannello 2); superficie libera nella camera di assorbimento misurata dalla cima della camera (pannello 3); pressione nella camera d'aria (pannello 4); velocità dell'aria nel condotto ospitante la turbina (pannello 5).



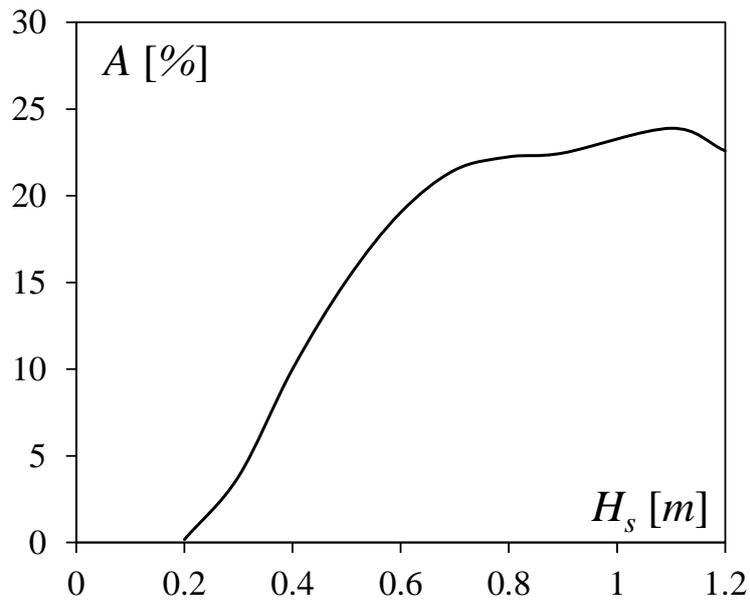
**Figura 15.** Regrazioni relative ad uno stato di mare con spettro di frequenza JONSWAP medio e altezza significativa  $H_s=0.8\text{m}$ , per REWEC3 con camera partizionata. In particolare, dal pannello superiore si ha: superficie libera di fronte alla parete (pannello 1); fluttuazione di pressione all'imboccatura (pannello 2); superficie libera nella camera di assorbimento misurata dalla cima della camera (pannello 3); pressione nella camera d'aria (pannello 4); velocità dell'aria nel condotto ospitante la turbina (pannello 5).



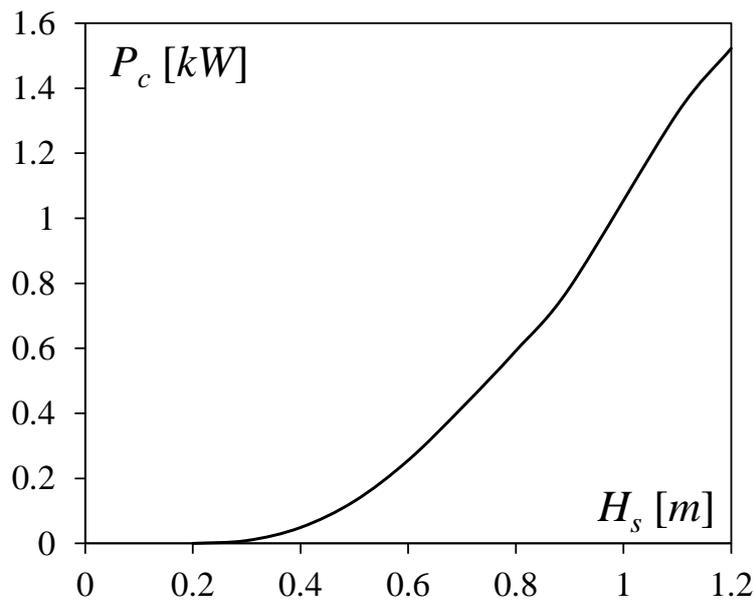
**Figura 16.** Registrazioni relative ad uno stato di mare con spettro di frequenza JONSWAP medio e altezza significativa  $H_s=1.0\text{m}$ , per REWEC3 con camera partizionata. In particolare, dal pannello superiore si ha: superficie libera di fronte alla parete (pannello 1); fluttuazione di pressione all'imboccatura (pannello 2); superficie libera nella camera di assorbimento misurata dalla cima della camera (pannello 3); pressione nella camera d'aria (pannello 4); velocità dell'aria nel condotto ospitante la turbina (pannello 5).



**Figura 17.** Registrazioni relative ad uno stato di mare con spettro di frequenza JONSWAP medio e altezza significativa  $H_s=1.2m$ , per REWEC3 con camera partizionata. In particolare, dal pannello superiore si ha: superficie libera di fronte alla parete (pannello 1); fluttuazione di pressione all’imboccatura (pannello 2); superficie libera nella camera di assorbimento misurata dalla cima della camera (pannello 3); pressione nella camera d’aria (pannello 4); velocità dell’aria nel condotto ospitante la turbina (pannello 5).



**Figura 18.** Coefficiente di conversione definito come il rapporto tra la potenza media convertita dall'impianto e la potenza media incidente, calcolato per soglie di altezza significativa.



**Figura 19.** Potenza media convertita dall'impianto vs altezza significativa.

## Riferimenti bibliografici

- Boccotti, P., 2003. On a new wave energy absorber. *Ocean Engineering* 30 (9), 1191-1200.
- Boccotti, P., 2007a. Caisson breakwaters embodying an OWC with a small opening—Part I: Theory. *Ocean Engineering* 34 (5-6), 806-819.
- Boccotti, P., 2007b. Comparison between a U-OWC and a conventional OWC. *Ocean Engineering* 34 (5-6), 799-805.
- Boccotti, P., Filianoti, P., Fiamma, V., Arena, F., 2007. Caisson breakwaters embodying an OWC with a small opening-Part II: A small-scale field experiment. *Ocean Engineering* 34 (5-6), 820-841.
- Curran, R., Gato, L.M.C., 1997. 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, 133-145.
- Goda, Y., 1974. New Wave Pressure Formulae for Composite Breakwater. *Proc. 14<sup>th</sup> Conf. Coastal Eng.*, 1702-1720.
- Goda Y, 1999. *Random Seas and Design in Maritime Structures*. World Scientific.
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Eake, K., Euring, J.A., Gicnapp, A., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Mullen, P., Olbers, D.J., Richren, K., Sell, W., Walden, H., 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint North Sea wave project (JONSWAP). *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift A8*, 1-95.
- Malara, G., Arena, F., 2013. Analytical modelling of an U-Oscillating Water Column and performance in random waves. *Renewable Energy* 60, 116-126.

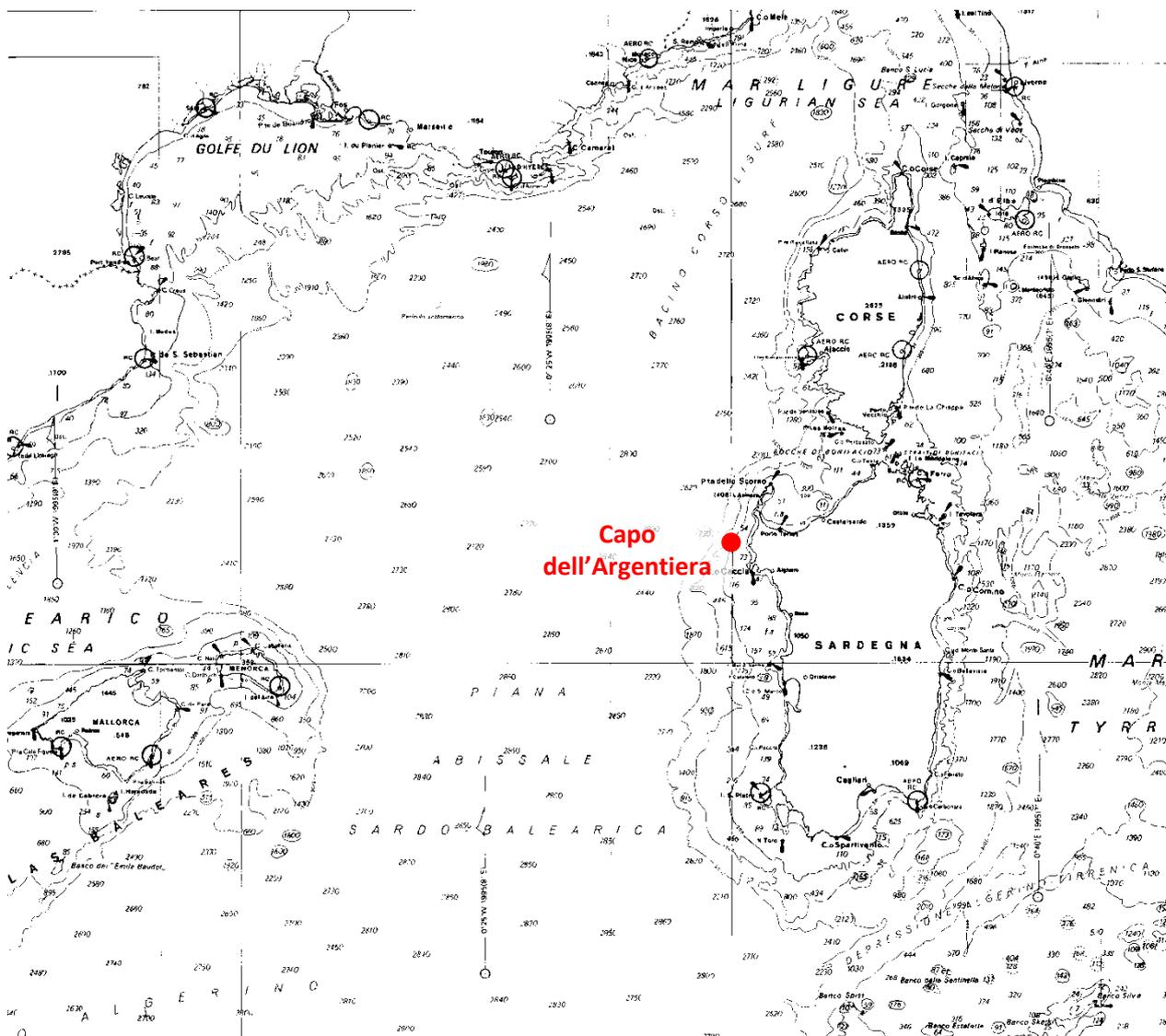
## APPENDICE

### IV. Clima ondoso e energia disponibile a Capo dell'Argentiera

#### IV.1 Individuazione dell' area campione

Il tratto di mare a maggiore intensità energetica in Italia è notoriamente quello antistante la parte nord-occidentale della Sardegna. Nella parte I del presente rapporto si è anche determinato che tale area è la più significativa dell'intero Mediterraneo da un punto di vista energia associata al moto ondoso. In particolare, è stata scelta come area campione, in cui stimare le potenzialità energetiche, lo specchio acqueo prospiciente Capo dell' Argentiera.

Lo scopo della presente analisi è quello di verificare la possibilità di installazione di sistemi di sfruttamento dell'energia ondosa. In particolare, l'utilizzo del sistema REWEC3 ha il vantaggio di poter essere integrato nelle dighe marittime a protezione di porti, ma nel presente caso tale sistema potrebbe essere conveniente indipendentemente dalla presenza di strutture portuali grazie alla elevata energia disponibile del moto ondoso nel tratto di mare oggetto di studio e alle elevate efficienze di resa energetica del sistema REWEC.



**Figura 1.** Individuazione della area campione sulla carta nautica del Mediterraneo occidentale.

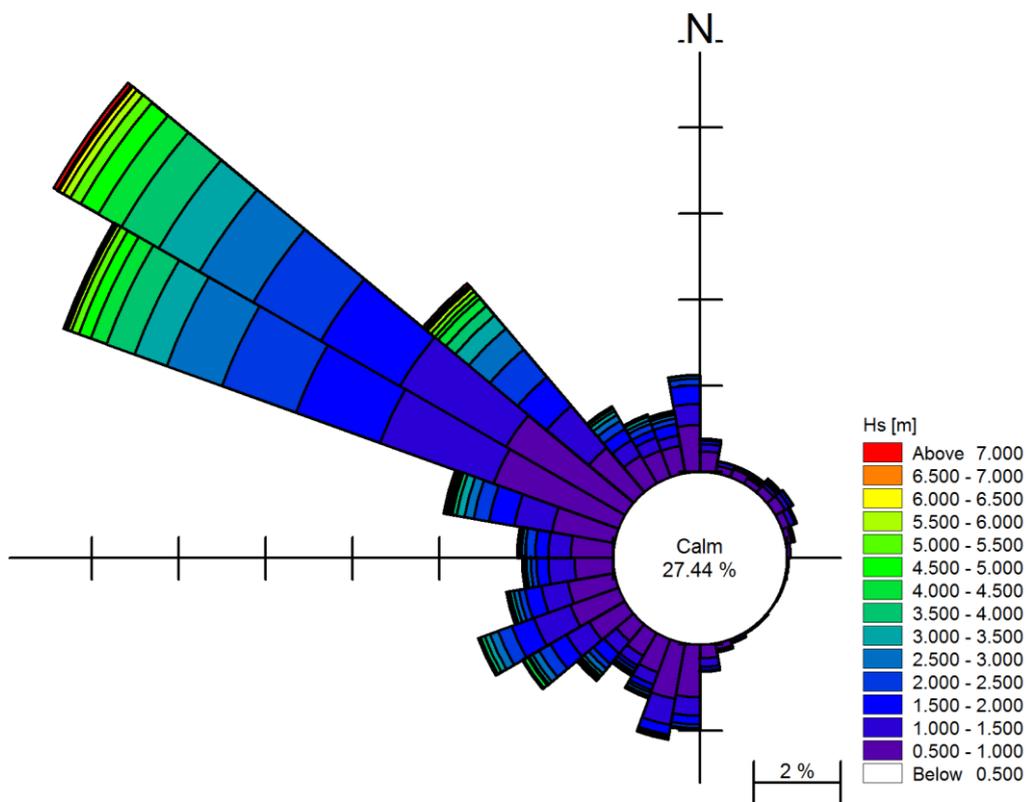
### IV.2 Clima medio al largo

I dati di moto ondoso sono estratti dal modello dell' ENEA al largo dell'area campione, in corrispondenza del punto di coordinate geografiche 40,7625°N 8,00°E, a profondità di circa 250 m rispetto al livello medio del mare, in modo che il moto ondoso non risenta del fondale nemmeno in corrispondenza degli eventi estremi.

Nella presente analisi del moto ondoso nell'area campione di Capo dell'Argentario vengono considerati i dati triorari stimati dal modello dell'ENEA dal 2001 al 2010. In particolare, per ciascun dato triorario, sono considerate in modo separato le componenti ondose di mare lungo (Swell) e quelle relative alle onde di vento (Wind waves). Questa distinzione risulta importante ai fini della progettazione di un impianto di sfruttamento dell'energia ondosa di tipo REWEC.

I dati di moto ondoso al largo vengono anche considerati in modo aggregato, ai fini di fornire una prima indicazione sul clima medio annuo. A tal fine essi sono raggruppati in classi di altezza d'onda significativa, direzione di provenienza e periodo medio. Per ciascuna classe si determina 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.

La rappresentazione polare del clima medio annuo, mostrata in Figura 2, consente di dedurre le principali caratteristiche del moto ondoso al largo. Nel caso specifico si nota che i settori con moto ondoso più intenso sono quelli occidentali con particolare riferimento a quello Nord-Occidentale, dalle cui direzioni arrivano le mareggiate più intense e frequenti. Si sottolinea inoltre che le onde più elevate superano i 9 m di altezza.



**Figura 2.** Rosa del clima ondoso nel punto al largo di Capo dell'Argentario, di coordinate 40,7625°N 8,00°E.

### IV.3 Energia ondosa al largo

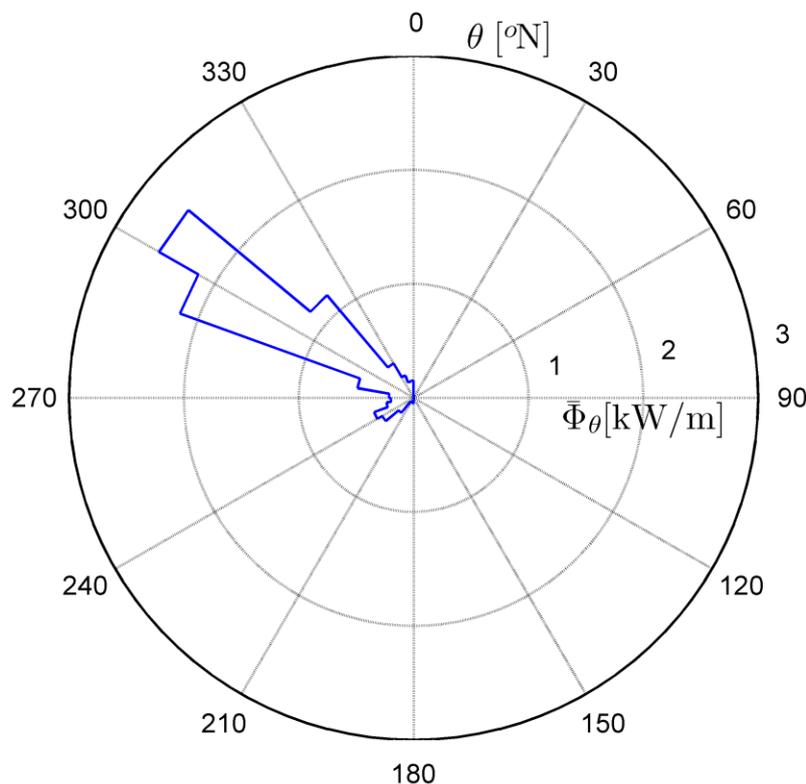
Considerando che lo scopo del presente lavoro è di valutare la possibilità di sfruttare l'energia ondosa del mare, risulta opportuno procedere alla stima del flusso di energia legato al clima ondoso al largo dell' area campione individuata. A tale scopo, viene utilizzata una formulazione che consente di calcolare il flusso di

energia per unità di larghezza ( $\Phi$ ) relativo a ciascuna componente di stato di mare (Swell e wind waves) mediante la formulazione espressa nella sezione I in cui si fa riferimento all'altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) ed al periodo medio ( $T_m$ ).

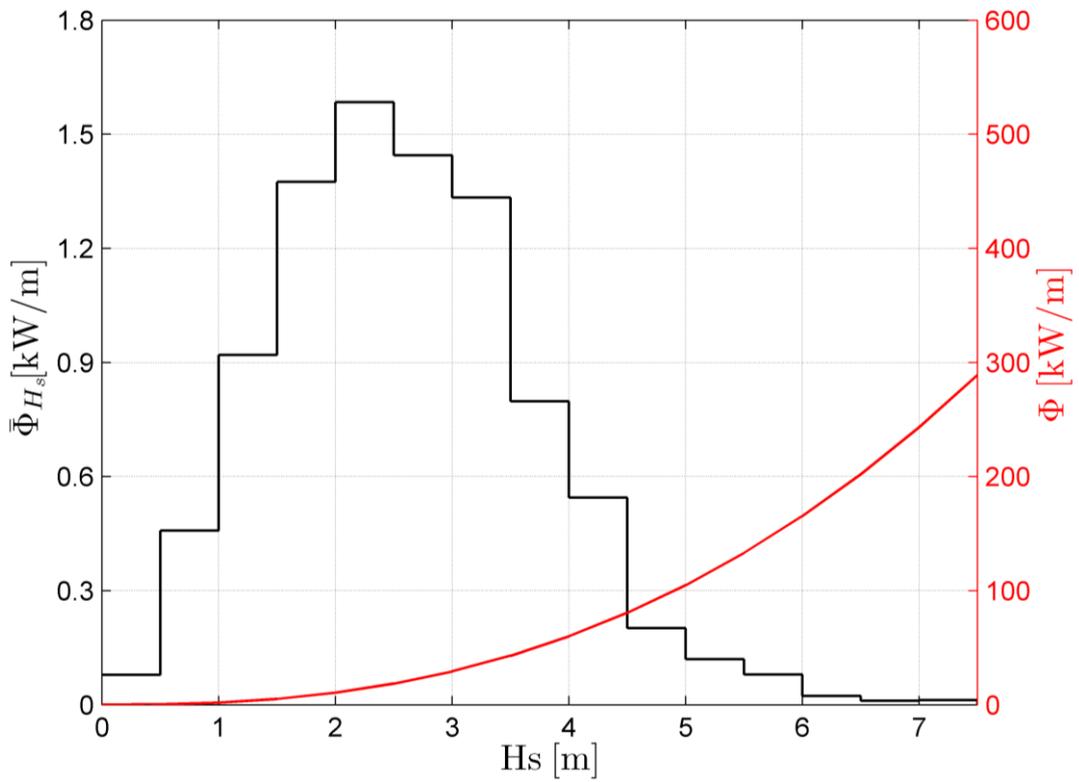
Il flusso di energia unitario così introdotto è ricavato per ogni condizione ondosa trionfaria disponibile, considerando separatamente le componenti di mare lungo e di onde di vento. Al fine di poter considerare il flusso di energia complessivo ( $\bar{\Phi}$ ) ciascun valore unitario è moltiplicato per la corrispondente frequenza di apparizione (3 ore/10 anni) allo scopo di ottenere il flusso di energia medio, ovvero l'energia media per unità di lunghezza, misurata in kW/m. Il flusso di energia al largo risulta essere dunque pari a 9,0 kW/m per la componente di mare lungo e 4,5 kW/m per la componente di onde di vento. Se ne deduce che nel tratto di mare in esame la componente ondosa di mare lungo fornisce una energia nettamente superiore rispetto alle componenti di mare vivo (wind sea).

Il flusso di energia così ottenuto può essere inoltre raggruppato in classi di direzione e di altezza d'onda, ottenendo, rispettivamente, le funzioni  $\bar{\Phi}_\theta$  e  $\bar{\Phi}_{H_s}$ . Tali funzioni sono rappresentate nelle Figure 3 e 4 per le componenti ondose di mare lungo e nelle Figure 5 e 6 per quelle di mare vivo. Si può notare che per entrambe le componenti ondose il settore direzionale cui affinisce la maggiore energia è compreso tra 290 e 320°N. La analisi del flusso di energia in funzione della altezza d'onda evidenzia che per le onde di swell è presente un picco di energia ben pronunciato tra le altezze 1,5 e 3,5 m; invece le componenti di wind waves forniscono un flusso di energia basso ma più uniforme rispetto a quelle di swell.

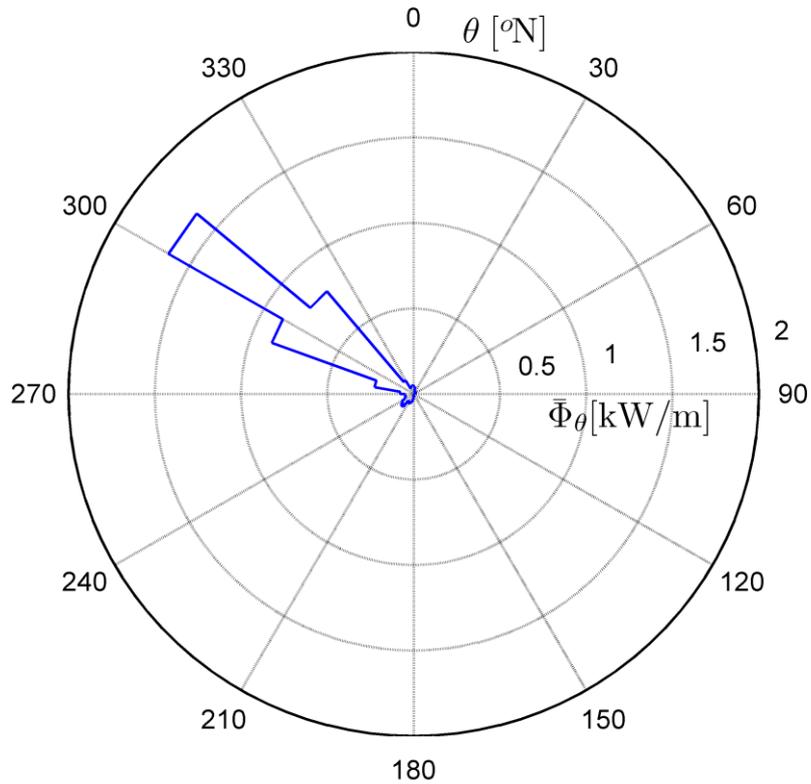
Tali risultati sono da considerarsi indicativi ed approssimati per eccesso rispetto all'effettiva energia disponibile nell'area campione in quanto non tengono conto dell'effetto del fondo e dei conseguenti fenomeni di rifrazione ed irripidimento delle onde. Nel proseguo del presente lavoro tale limitazione viene rimossa in modo da fornire valori più attendibili del flusso di energia disponibile.



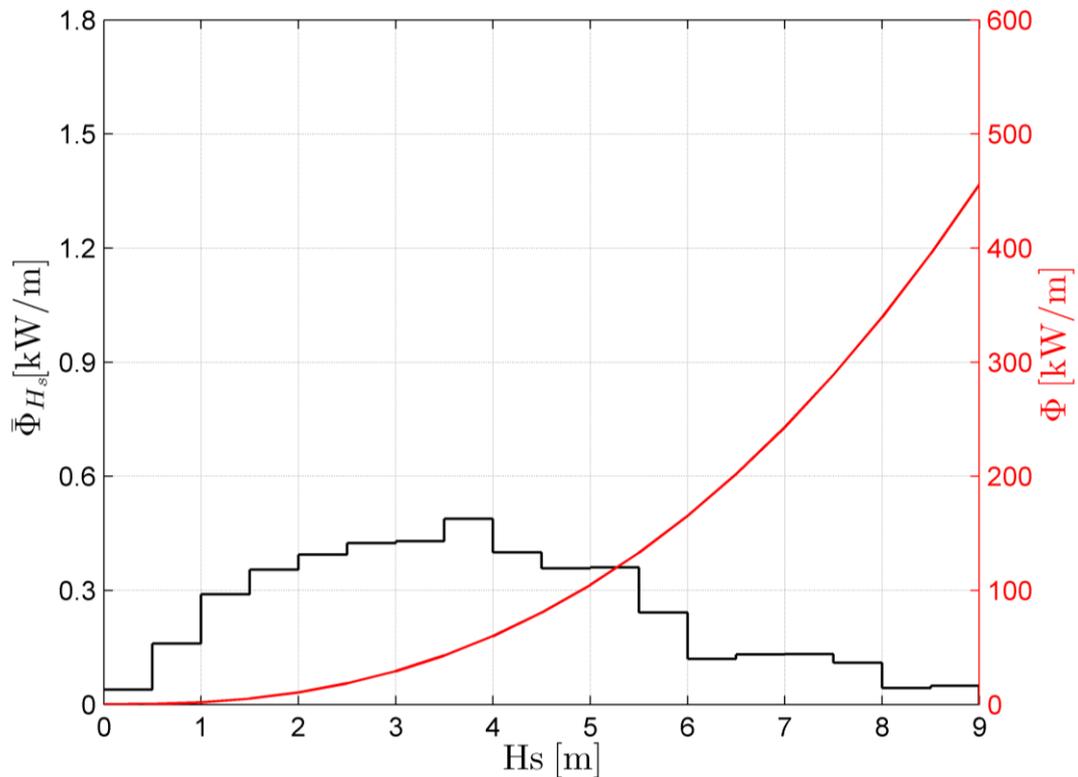
**Figura 3.** Grafico polare del flusso di energia al largo di Capo dell'Argentario, per le onde di mare lungo.



**Figura 4.** Flusso di energia in funzione della altezza d'onda al largo, per le onde di mare lungo (swell).



**Figura 5.** Grafico polare del flusso di energia al largo di Capo dell'Argentiera, per le onde di mare vivo (wind waves).



**Figura 6.** Flusso di energia in funzione della altezza d’onda al largo, per le wind waves.

#### IV.4 Metodologia utilizzata per la propagazione del moto ondoso verso la costa

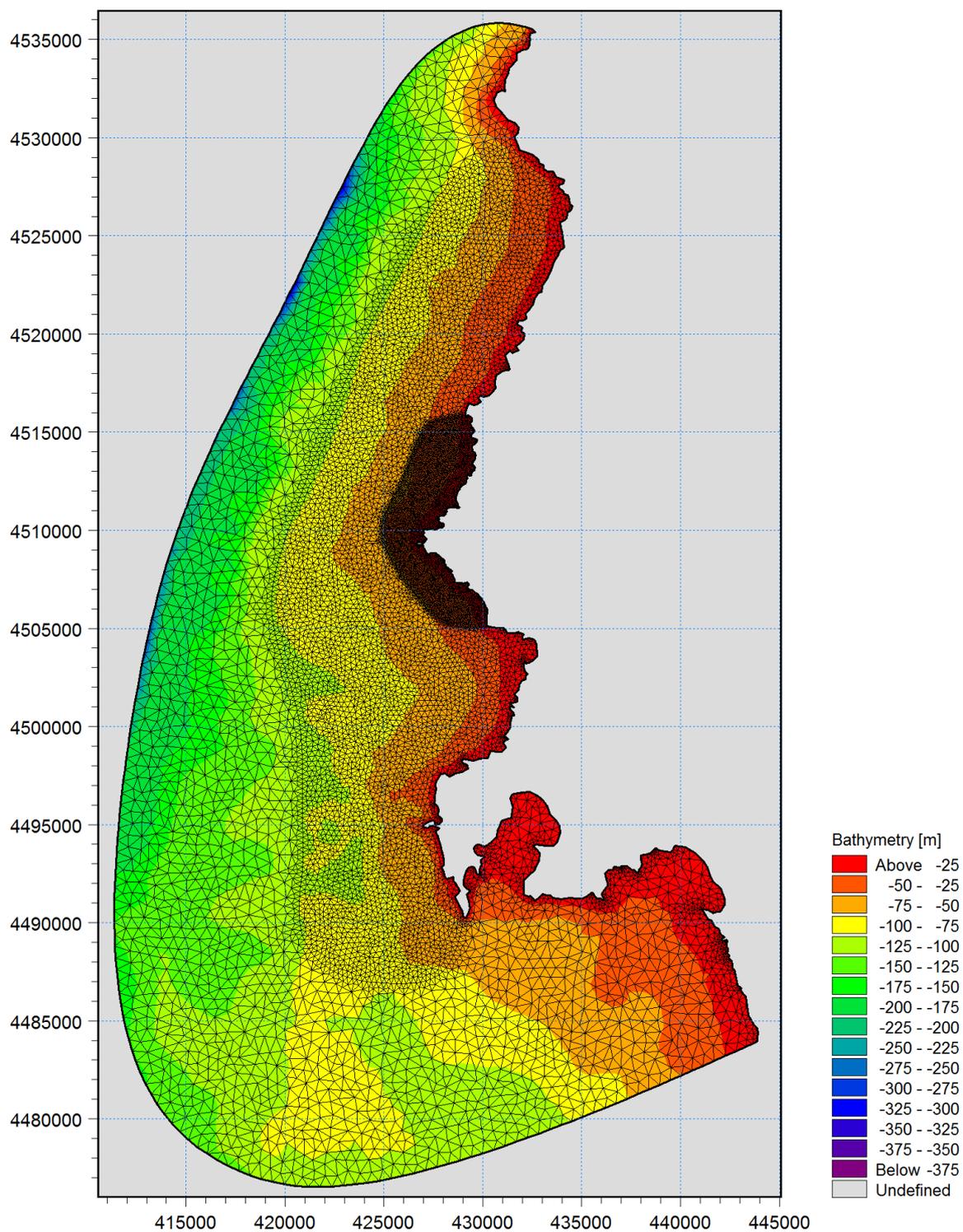
I principali fenomeni che bisogna prendere in considerazione per la stima della propagazione delle onde sottocosta, in zone poco ridossate, sono la rifrazione, lo shoaling ed il frangimento. Nel presente studio le profondità di estrazione dei dati è pari a 30 m (profondità intermedia) e dunque il fenomeno di frangimento non influisce sulla propagazione delle onde fino alla zona di interesse.

Lo studio della trasformazione del moto ondoso verso la costa è stato eseguito mediante l’utilizzo del codice di calcolo MIKE 21 SW, modello d’onda a griglia flessibile (Flexible Mesh). Tale modello simula la crescita, il decadimento e la trasformazione di onde generate dal vento e di onde lunghe (swell) sia al largo che sottocosta. In particolare, è stata utilizzata la formulazione parametrica disaccoppiata, che è basata su una parametrizzazione della equazione di conservazione della azione ondosa. La parametrizzazione è eseguita nel dominio delle frequenze mediante l’introduzione dei momenti di ordine zero e uno dello spettro delle onde come variabili dipendenti, come proposto da [1] .

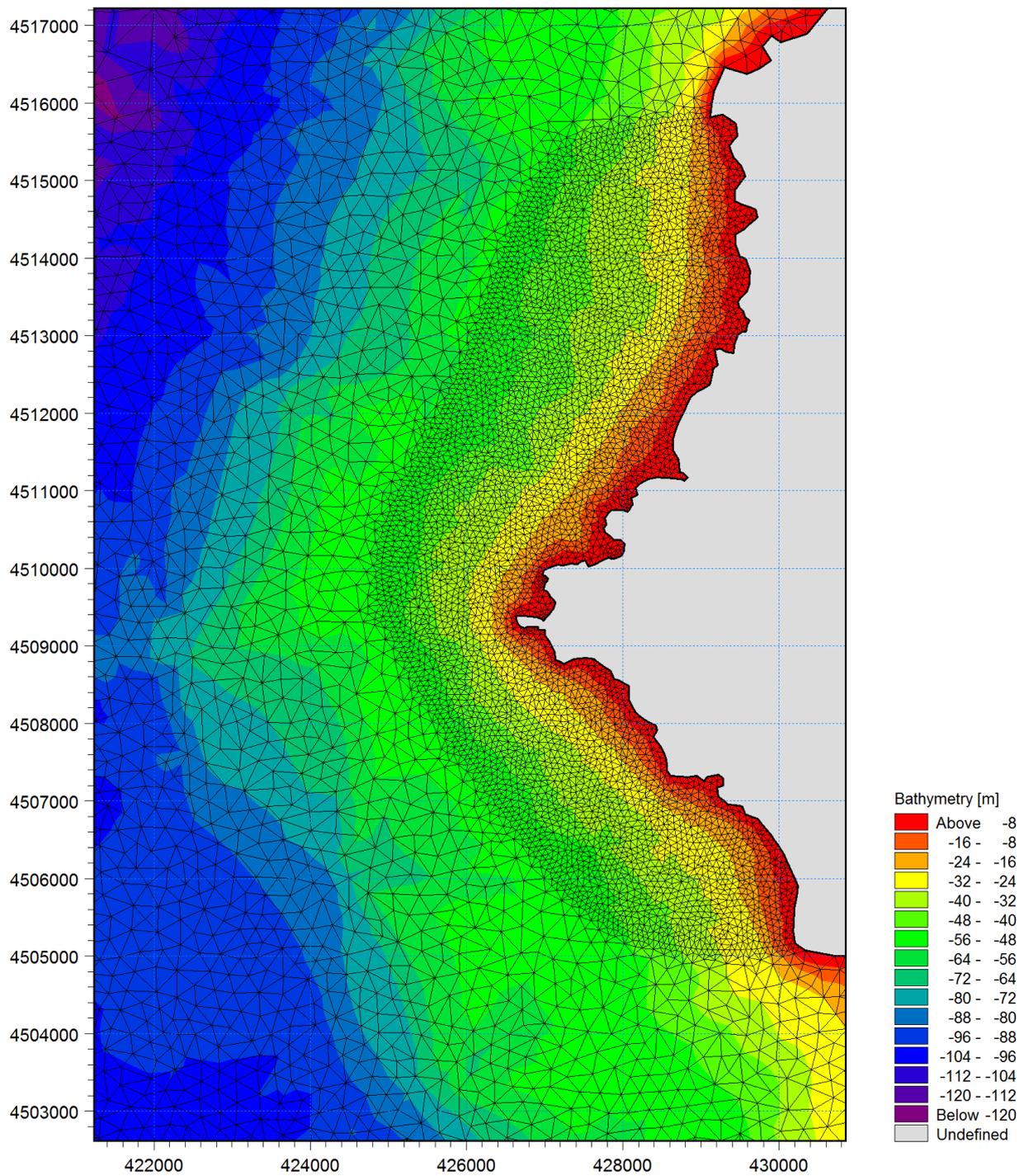
Il modello adottato include i principali fenomeni interessati nella propagazione delle onde, ovvero: i) interazione non lineare tra le onde; ii) dissipazione dovuta al frangimento al largo di tipo “white capping”; iii) dissipazione dovuta alla scabrezza del fondo; iv) dissipazione dovuta al frangimento indotto dalla profondità; v) rifrazione e irripidimento causati dalle variazioni di profondità; vi) interazione onde-correnti. La discretizzazione della equazione di base del modello nel dominio geografico ed in quello spettrale è eseguita mediante il metodo dei volumi finiti, centrato nelle celle. Nel dominio geografico è usata una tecnica a maglia non strutturata.

La griglia di calcolo utilizzata per l’area campione di Capo dell’ Argentiera è mostrata in Figura 7, in cui viene riportata la batimetria di input del modello numerico con la rappresentazione degli elementi triangolari tipici della “Flexible Mesh”. Come si può osservare, la risoluzione della maglia è stata notevolmente incrementata nella zona di maggior interesse, mostrata nel dettaglio in Figura 8.

Le informazioni relative alla linea di costa e alle quote di fondo sono state ricavate dalle carte nautiche fornite dall’Istituto Geografico Militare.



**Figura 7.** Rappresentazione della intera griglia utilizzata per il modello di trasformazione dell'onda.



**Figura 8.** Griglia utilizzata per il modello di trasformazione dell'onda, zona di interesse per lo studio.

Le condizioni ondose da considerare in ingresso al modello numerico utilizzato hanno altezza d'onda pari a 1m e consistono di tutte le possibili combinazioni di periodi d'onda di picco comprese tra 0,5 e 15,5 s e di direzioni di provenienza interne al settore di traversia (tra 160 e 360°N e tra 0 e 30°N). Gli intervalli di campionamento dei periodi d'onda sono pari a 0,5 s e quelli delle direzioni sono pari a 10°.

Questa discretizzazione delle condizioni ondose in ingresso consente di ottenere delle mappe del coefficiente di shoaling-rifrazione per tutti i possibili stati di mare ivi presenti e dunque è possibile stimare la serie storica trioraria delle componenti ondose di mare vivo e di swell sottocosta per tutti i punti compresi nella griglia di calcolo.

### IV.5 Risultati del modello SW

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 Figura 9) la distribuzione della altezza d'onda significativa per un'onda tipo avente direzione di provenienza compresa tra 290 e 300°N.

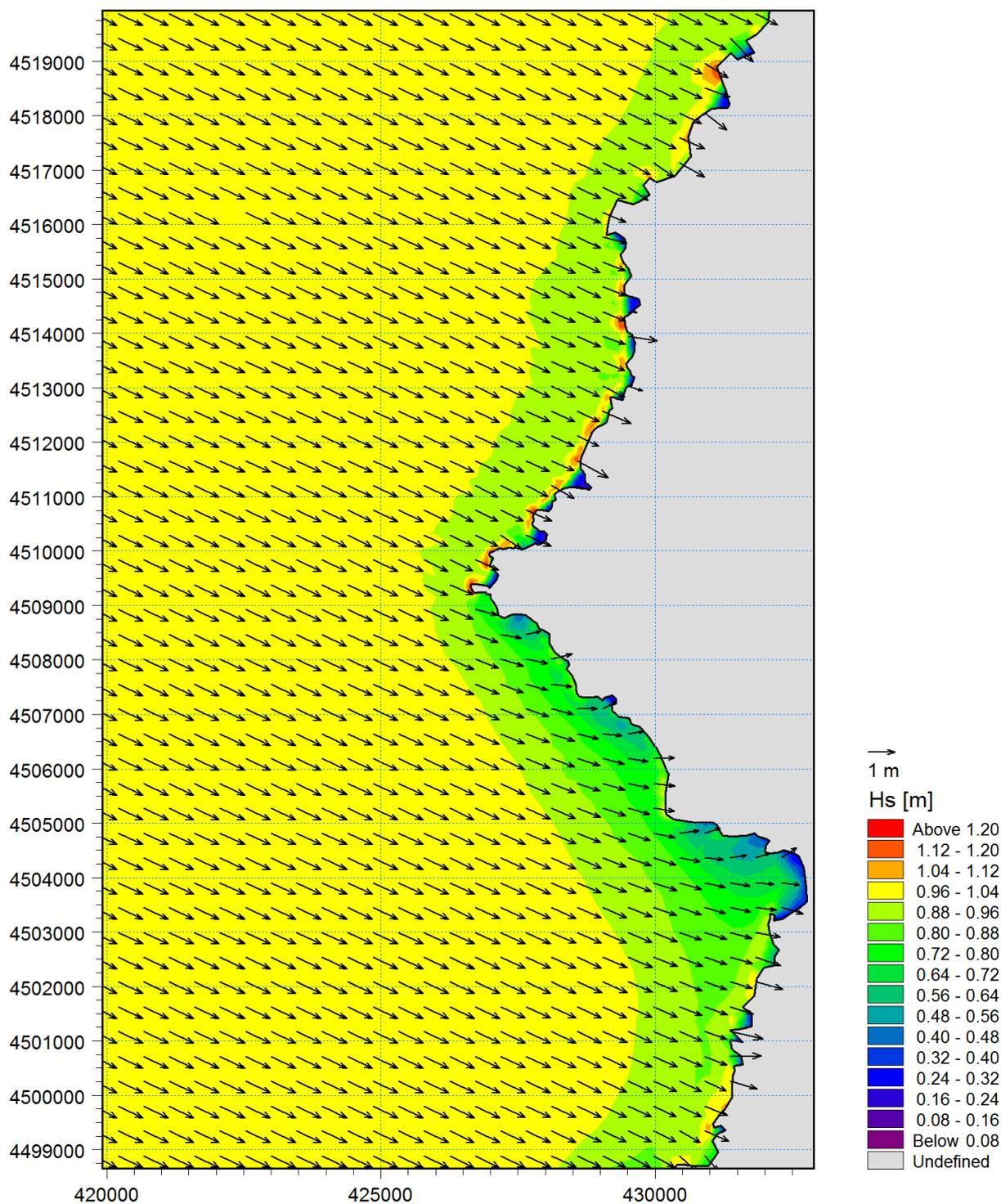
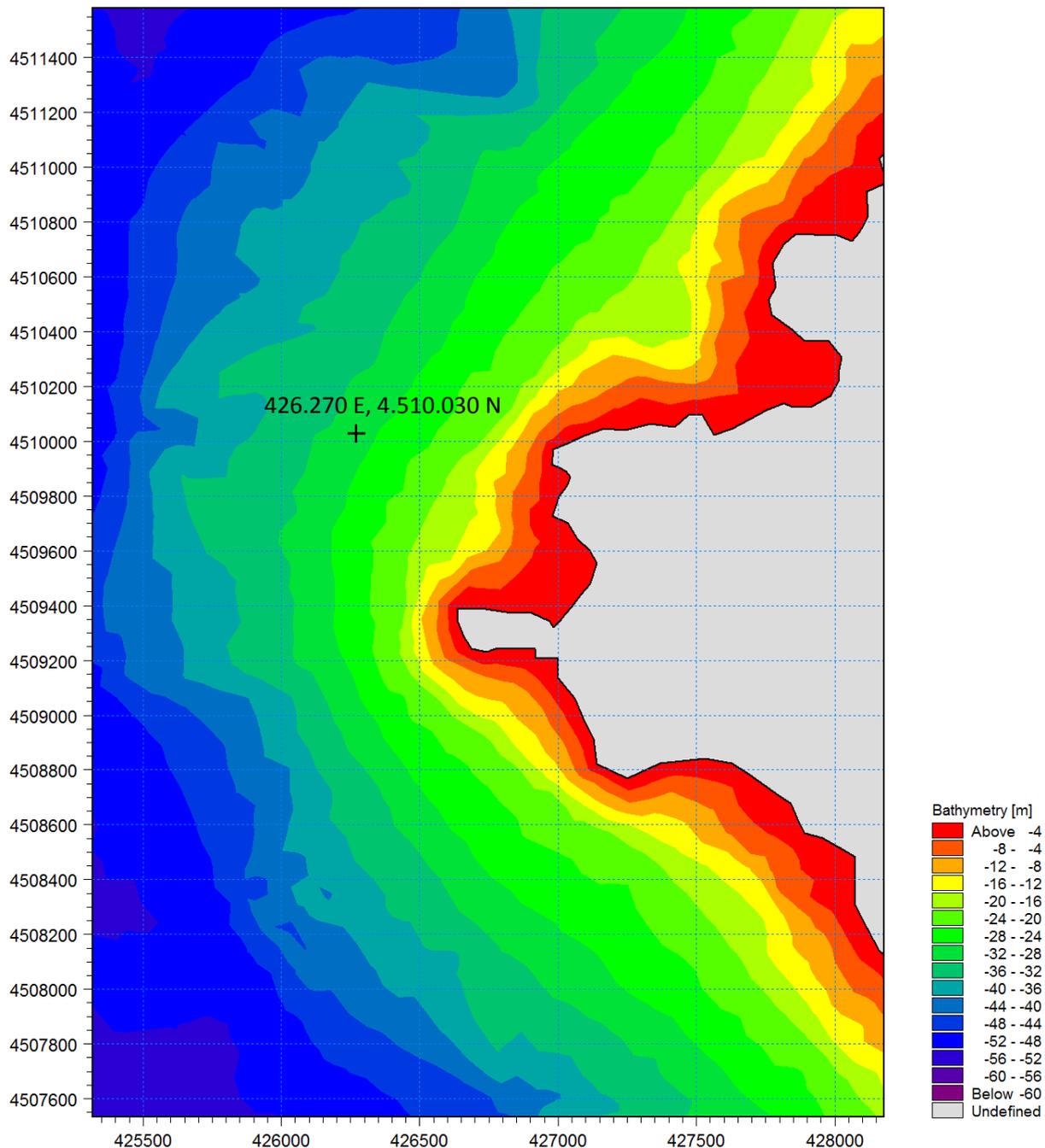


Figura 9. Distribuzione della altezza d'onda per un evento ondoso tipo proveniente da Nord-Ovest

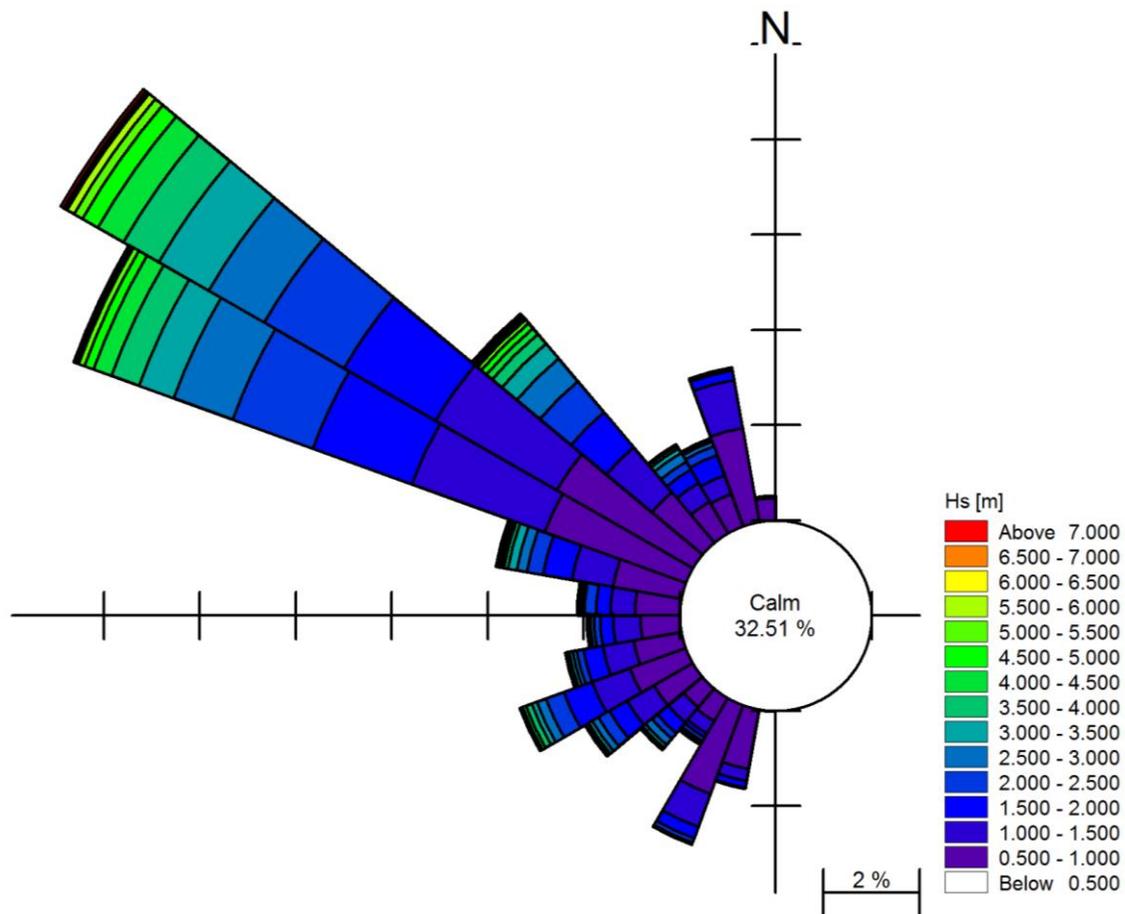
I risultati sono stati estratti in corrispondenza di un punto antistante Capo dell'Argentiera posto su profondità intermedia (30m s.l.m.), in cui il moto ondoso non risente dell'effetto del frangimento. Come mostrato in Figura 10, le coordinate del punto di estrazione, nel sistema di riferimento UTM32 sono 426.270 E, 4.510.030 N.



**Figura 10.** Individuazione del punto di estrazione dei risultati del modello su profondità di 30m s.l.m.m.

In Figura 11 viene riportata la rosa del clima ondoso caratteristico trasferito sottocosta per il punto considerato, ottenuto aggregando le componenti ondose di mare vivo e di swell. Dalla comparazione con i corrispondenti dati al largo si evidenzia una riduzione delle altezze d'onda, in modo particolare per le onde aventi direzione di provenienza maggiormente inclinata rispetto alla costa, ovvero quelle poste ai limiti del settore di traversia.

Al fine di eseguire una analisi di dettaglio della energia ondosa sottocosta, disponibile e prodotta dal sistema REWEC, è possibile ricavare la frequenza di apparizione delle onde per classi di altezza significativa e periodo medio, come mostrato nelle Tabelle 1 e 2, rispettivamente per le componenti ondose di swell e di mare vivo.



**Figura 11.** Clima ondoso sottocosta rappresentativo dell'area campione analizzata.

Tm [s]	Hs [m] sottocosta - punto a profondità 30m s.l.m.m.							
	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0	4.0-4.5
1 - 2	-	-	-	-	-	-	-	-
2 - 3	-	-	-	-	-	-	-	-
3 - 4	0.350	-	-	-	-	-	-	-
4 - 5	6.754	0.141	0.003	-	-	-	-	-
5 - 6	12.564	2.369	0.086	0.003	-	-	-	-
6 - 7	4.679	7.624	1.543	0.096	0.014	-	-	-
7 - 8	0.936	3.754	5.218	1.423	0.123	0.038	-	-
8 - 9	0.233	1.118	2.314	3.051	1.090	0.264	0.034	0.007
9 - 10	0.079	0.456	0.696	1.142	1.519	0.836	0.264	0.055
10 - 11	0.045	0.182	0.343	0.326	0.411	0.545	0.329	0.089
11 - 12	-	0.055	0.161	0.182	0.123	0.158	0.134	0.065
12 - 13	-	0.003	0.017	0.048	0.007	0.010	0.024	0.024
13 - 14	-	-	-	-	-	-	-	-
14 - 15	-	-	-	-	-	-	-	-
15 - 16	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>TOT</b>	<b>25.64</b>	<b>15.70</b>	<b>10.38</b>	<b>6.27</b>	<b>3.29</b>	<b>1.85</b>	<b>0.79</b>	<b>0.24</b>

**Tabella 1a.** Frequenza di apparizione percentuale sottocosta delle componenti di swell degli stati di mare per classi di periodo medio compreso tra 1 e 13 s e altezza d'onda significativa tra 0,5 e 4,5 m.

Tm [s]	Hs [m] sottocosta - punto a profondità 30m s.l.m.m.							
	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5
1 - 2	-	-	-	-	-	-	-	-
2 - 3	-	-	-	-	-	-	-	-
3 - 4	-	-	-	-	-	-	-	-
4 - 5	-	-	-	-	-	-	-	-
5 - 6	-	-	-	-	-	-	-	-
6 - 7	-	-	-	-	-	-	-	-
7 - 8	-	-	-	-	-	-	-	-
8 - 9	-	-	-	-	-	-	-	-
9 - 10	0.024	0.007	-	-	-	-	-	-
10 - 11	0.031	0.021	0.010	-	-	-	-	-
11 - 12	0.045	0.017	0.003	0.003	0.003	-	-	-
12 - 13	0.007	0.014	-	-	-	-	-	-
13 - 14	-	-	-	-	-	-	-	-
14 - 15	-	-	-	-	-	-	-	-
15 - 16	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>TOT</b>	<b>0.11</b>	<b>0.06</b>	<b>0.01</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>

**Tabella 1b.** Frequenza di apparizione percentuale sottocosta delle componenti di swell degli stati di mare per classi di periodo medio compreso tra 1 e 13 s e altezza d'onda significativa tra 4,5 e 8,5 m.

Tm [s]	Hs [m] sottocosta - punto a profondità 30m s.l.m.m.							
	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0	4.0-4.5
1 - 2	-	-	-	-	-	-	-	-
2 - 3	0.065	-	-	-	-	-	-	-
3 - 4	7.518	0.069	-	-	-	-	-	-
4 - 5	2.633	4.556	0.113	-	-	-	-	-
5 - 6	0.168	1.464	2.986	0.357	0.017	-	-	-
6 - 7	0.024	0.086	0.459	1.642	0.566	0.086	0.003	-
7 - 8	-	0.003	0.021	0.120	0.778	0.809	0.195	0.014
8 - 9	-	-	-	0.003	0.024	0.093	0.473	0.326
9 - 10	-	-	-	-	-	-	-	0.034
10 - 11	-	-	-	-	-	-	-	-
11 - 12	-	-	-	-	-	-	-	-
12 - 13	-	-	-	-	-	-	-	-
13 - 14	-	-	-	-	-	-	-	-
14 - 15	-	-	-	-	-	-	-	-
15 - 16	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>TOT</b>	<b>10.41</b>	<b>6.18</b>	<b>3.58</b>	<b>2.12</b>	<b>1.38</b>	<b>0.99</b>	<b>0.67</b>	<b>0.37</b>

**Tabella 2a.** Frequenza di apparizione percentuale sottocosta delle componenti di onde di vento degli stati di mare per classi di periodo medio compreso tra 1 e 13 s e altezza d'onda significativa tra 0,5 e 4,5 m.

Tm [s]	Hs [m] sottocosta - punto a profondità 30m s.l.m.m.							
	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5
1 - 2	-	-	-	-	-	-	-	-
2 - 3	-	-	-	-	-	-	-	-
3 - 4	-	-	-	-	-	-	-	-
4 - 5	-	-	-	-	-	-	-	-
5 - 6	-	-	-	-	-	-	-	-
6 - 7	-	-	-	-	-	-	-	-
7 - 8	-	-	-	-	-	-	-	-
8 - 9	0.144	0.034	-	-	-	-	-	-
9 - 10	0.147	0.165	0.065	0.027	0.010	-	-	-
10 - 11	-	-	0.007	0.024	0.041	0.031	0.007	0.010
11 - 12	-	-	-	-	-	-	0.003	-
12 - 13	-	-	-	-	-	-	-	-
13 - 14	-	-	-	-	-	-	-	-
14 - 15	-	-	-	-	-	-	-	-
15 - 16	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>TOT</b>	<b>0.29</b>	<b>0.20</b>	<b>0.07</b>	<b>0.05</b>	<b>0.05</b>	<b>0.03</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>

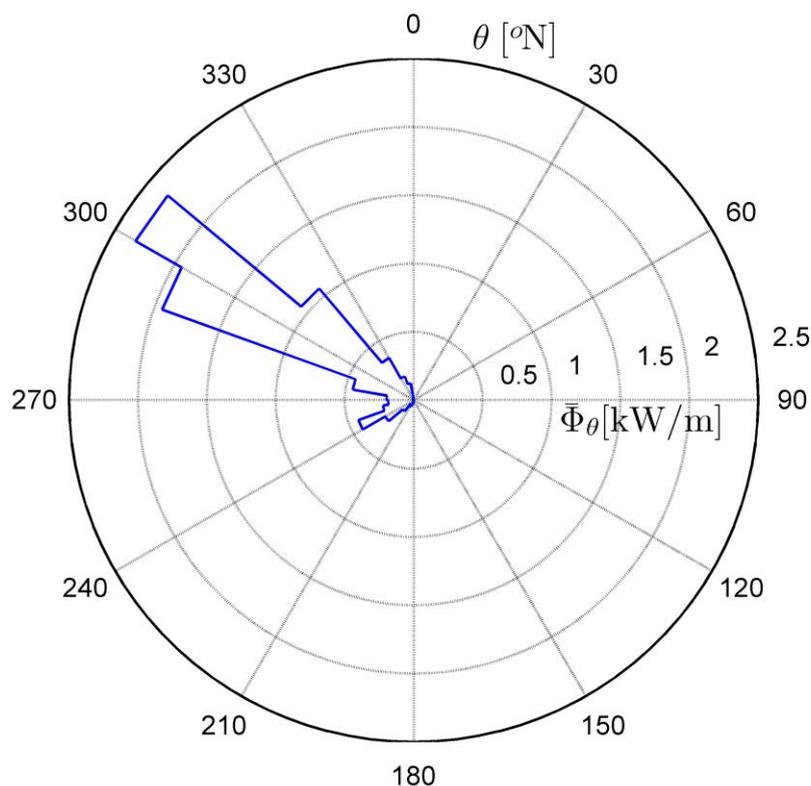
**Tabella 2b.** Frequenza di apparizione percentuale sottocosta delle componenti di onde di vento degli stati di mare per classi di periodo medio compreso tra 1 e 13 s e altezza d'onda significativa tra 4,5 e 8,5 m.

#### IV.6 Stima dell'energia disponibile sottocosta

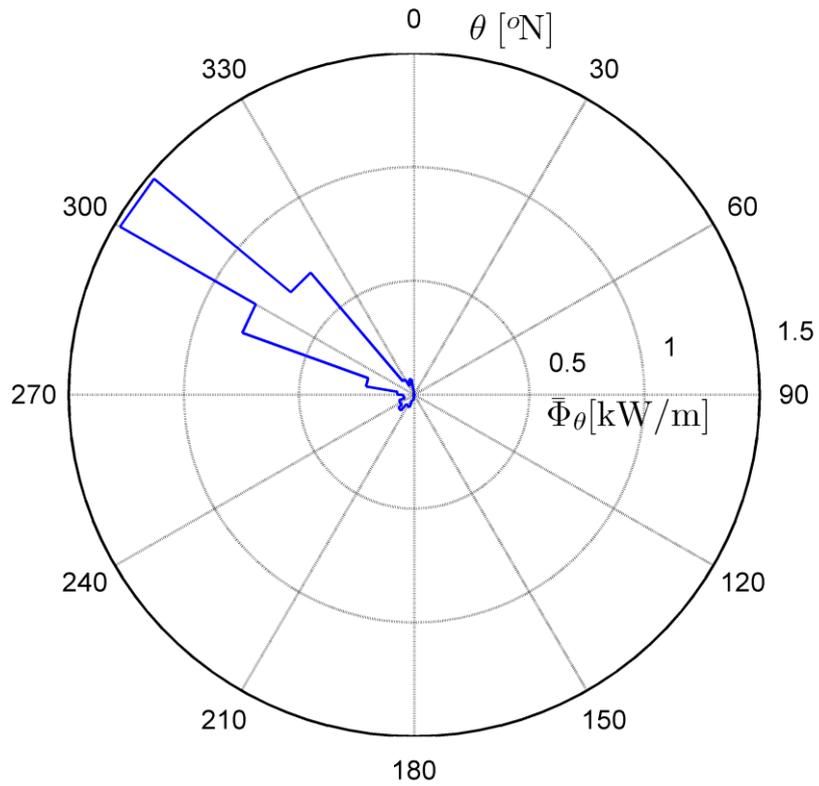
L'analisi delle caratteristiche del moto ondoso sottocosta ha evidenziato una riduzione poco intensa delle altezze d'onda al variare delle direzioni di propagazione. In modo analogo ci si aspetta una corrispondente riduzione della energia del moto ondoso.

La procedura seguita per il calcolo del flusso di energia disponibile sottocosta nelle aree campione è uguale a quella utilizzata a partire dai dati al largo: la serie storica propagata sottocosta, comprendente dati di altezza d'onda significativa e periodo medio di ciascun evento, viene utilizzata per stimare il flusso di energia per unità di larghezza di tutti gli stati di mare disponibili; valori di flusso di energia così ottenuti vengono moltiplicati per la frequenza di apparizione del singolo dato triorario e la somma di questi ultimi valori rappresenta il flusso medio di energia per unità di lunghezza, espresso in kW/m. Tale procedura, eseguita separatamente per le due componenti del moto ondoso consente di ottenere il flusso di energia disponibile sottocosta per le wind waves (pari a 3,9 kW/m) e per le componenti ondose di swell; quest'ultimo assume un valore di 8,0 kW/m e, in modo analogo alla situazione al largo, risulta avere un valore doppio rispetto al corrispondente valore desunto per le componenti ondose di mare vivo.

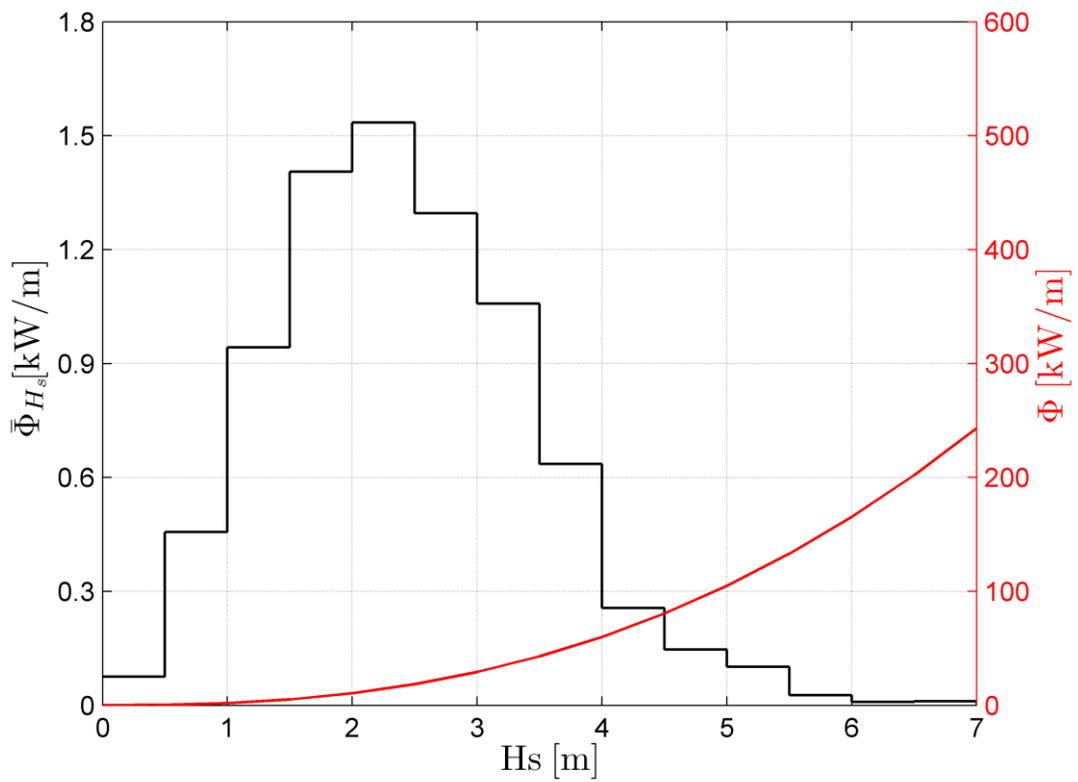
L'insieme di dati così derivati, ovvero il flusso di energia sottocosta associato ad ogni dato della serie storica trioraria, consente inoltre di analizzare l'andamento del flusso di energia in relazione alle principali caratteristiche del moto ondoso, ovvero la direzione di provenienza e l'altezza d'onda. Tali analisi sono di fondamentale importanza nelle fasi di scelta e progettazione dei sistemi di sfruttamento dell'energia ondosa. In particolare, nelle Figure 12 e 13 vengono mostrate la analisi direzionali del flusso di energia, rispettivamente per le componenti di swell e di mare vivo. Nelle Figure 14 e 15 sono invece rappresentati gli andamenti del flusso di energia in funzione della altezza d'onda significativa, rispettivamente per le componenti ondose di swell e di mare lungo. In quest'ultima tipologia di grafici è inoltre presente l'andamento del flusso di energia e della potenza, in modo da fornire una diretta cognizione della energia disponibile associata alle varie possibili condizioni ondose, al fine di favorire l'ottimizzazione delle caratteristiche progettuali dell'impianto di sfruttamento dell'energia ondosa.



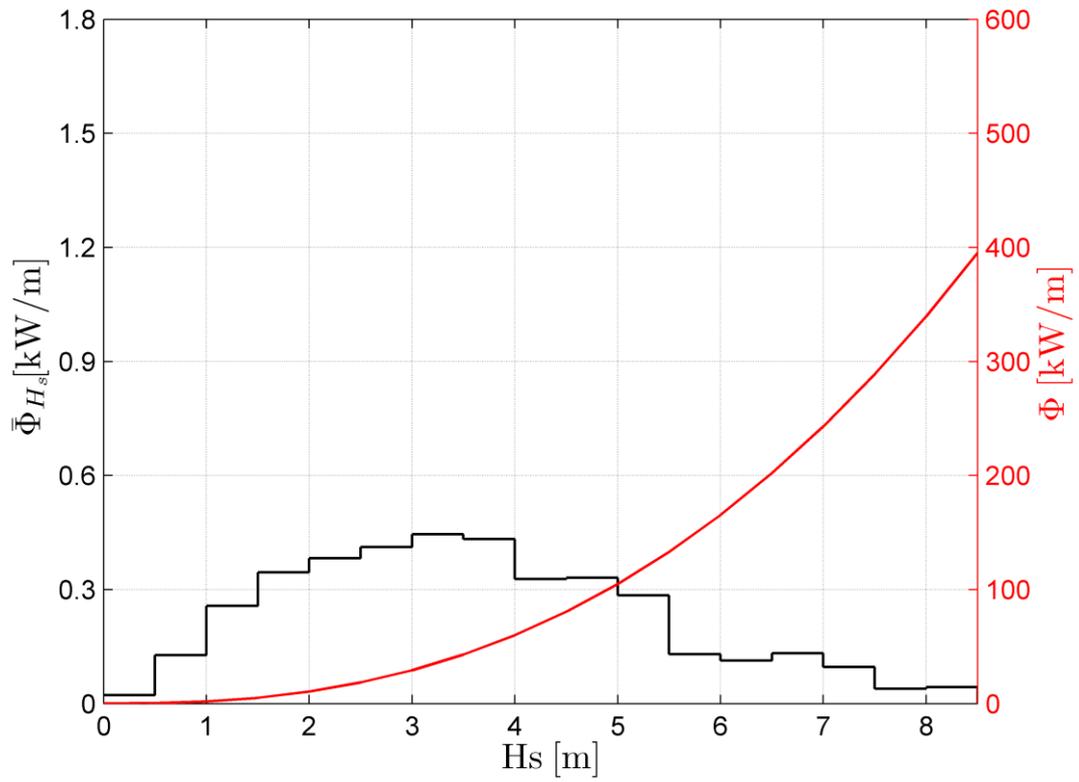
**Figura 12.** Flusso di energia sottocosta in funzione della direzione di provenienza per le onde di swell.



**Figura 13.** Flusso di energia sottocosta in funzione della direzione di provenienza per le onde di mare vivo.



**Figura 14.** Flusso di energia sottocosta e potenza in funzione della altezza  $H_s$  per le onde di swell.



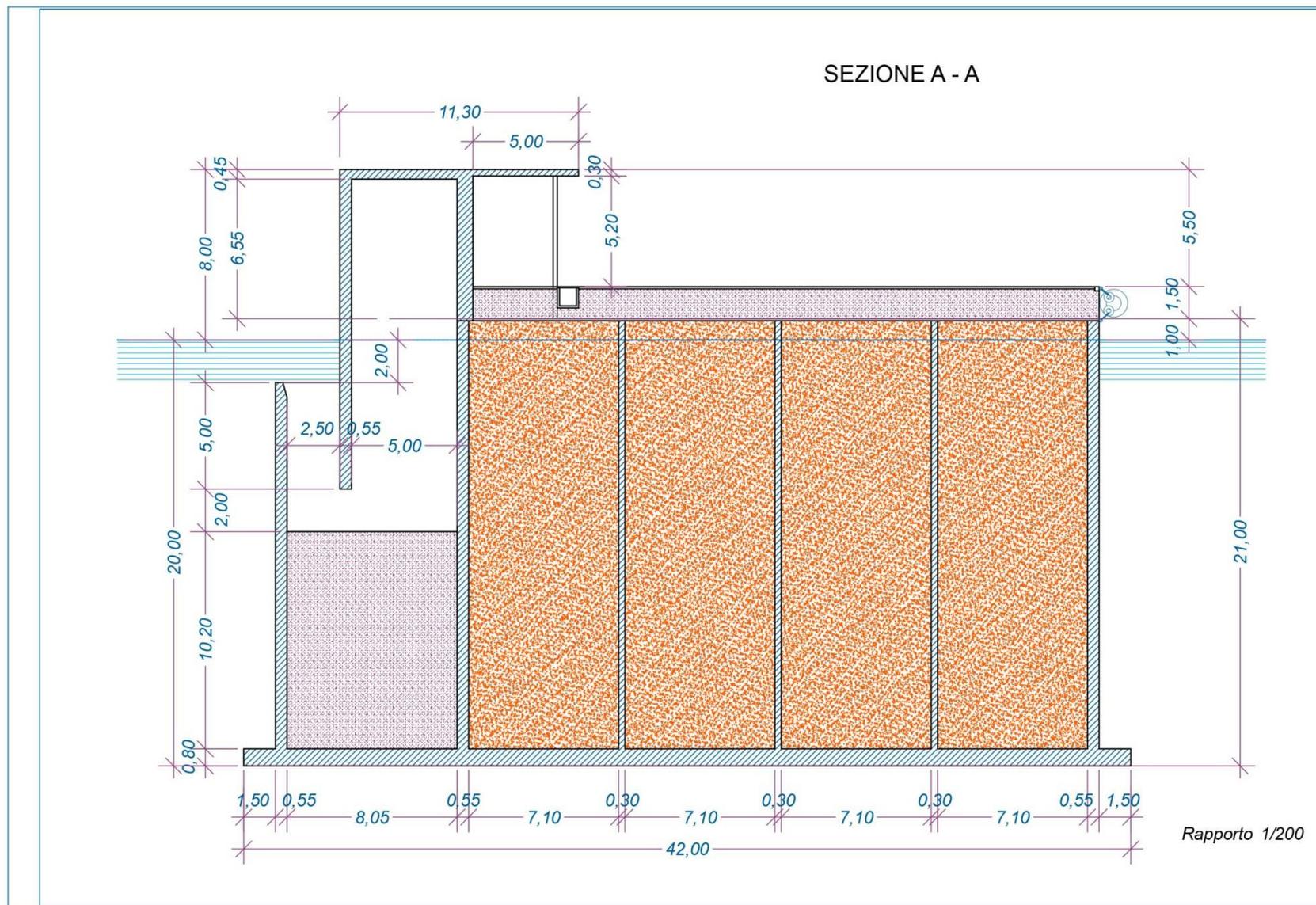
**Figura 15.** Flusso di energia sottocosta e potenza in funzione della altezza  $H_s$  per le onde di mare vivo.

## Riferimenti bibliografici Appendice

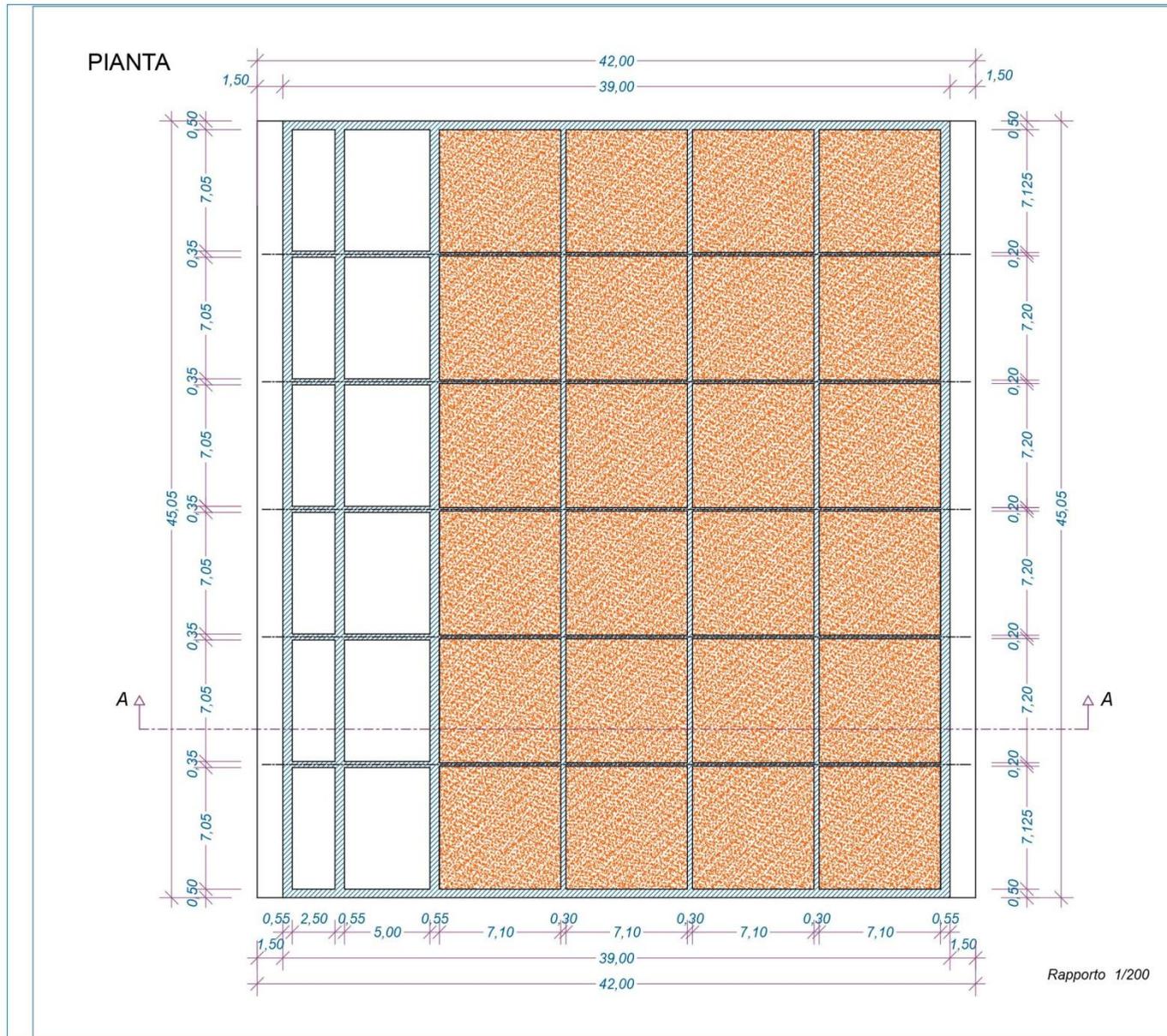
1. L.H. Holthuijsen, N. Booij, T.H.T Herbers, "A prediction model for stationary, short crested waves in shallow water with ambient currents", Coastal Engineering, 13 (1989), 23-54.

## Allegato A. Schema progettuale del sistema U-OWC a Capo dell'Argentiera

Di seguito sono riportate le sezioni e le piante derivanti dal dimensionamento eseguito per l'impianto U-OWC incorporato in diga portuale a cassone per il caso studio di Capo dell'Argentiera (Sardegna).



**Figura A.1** Sezione dell'U-OWC incorporato in diga portuale per la località di Capo dell'Argentiera (Sardegna Nord-Ovest).



**Figura A.2** Pianta dell'U-OWC incorporato in diga portuale per la località di Capo dell'Argentiera (Sardegna Nord-Ovest).

CURRICULUM VITAE DEL  
Prof. ing. FELICE ARENA  
PROFESSORE ORDINARIO DI COSTRUZIONI MARITTIME  
NELL'UNIVERSITÀ MEDITERRANEA DI REGGIO CALABRIA

Felice Arena, nato a Reggio Calabria il 16 maggio 1968, è Professore Ordinario di *Costruzioni Marittime* (SSD ICAR/02) presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Energia, Ambiente e Materiali (DICEAM) dell'Università 'Mediterranea' di Reggio Calabria. Da gennaio 2013, presso l'Università Mediterranea, egli è Prorettore con delega per il Trasferimento Tecnologico.

Allievo del Prof. Paolo Boccotti, a Reggio Calabria egli si è laureato in Ingegneria Civile il 21 luglio 1992, ottenendo la votazione di 110/110 e lode.

E' in servizio presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi 'Mediterranea' di Reggio Calabria dal 1997. Ha preso servizio da *Professore Ordinario* nel mese di gennaio 2005.

Arena è stato relatore/correlatore di oltre 70 tesi di laurea, su argomenti di Costruzioni Idrauliche e Costruzioni Marittime.

E' titolare dei corsi "Idraulica I" (3CFU) e "Costruzioni marittime I" (6CFU) per il Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e per il Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio e, insieme al prof. Boccotti, del corso "Costruzioni in mare aperto" per il Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile e per il Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio.

L'attività scientifica del Prof. Felice Arena riguarda: la meccanica delle onde irregolari generate dal vento, le proprietà statistiche delle onde negli stati di mare, le previsioni in tempi lunghi del moto ondoso e l'analisi di mareggiate estreme, i processi costieri, le sollecitazioni su strutture di difesa portuale e su strutture offshore, i sistemi di sfruttamento dell'energia delle onde di mare.

Egli è autore di oltre centosettanta memorie (di cui ventidue a nome singolo), pubblicate in prestigiose riviste internazionali (tra cui *Journal of Geophysical Research*, *Journal of Physical Oceanography*, *Journal of Fluid Mechanics*, *Renewable Energy*, *Ocean Modelling*, *Physics of Fluids*, *Coastal Engineering*, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, *European Journal of Mechanics*, *Probabilistic Engineering Mechanics*, *Ocean Engineering*, *ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, *Mathematical Problems in Engineering*, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, *Journal of Coastal Research*, *Applied Ocean Research*, *ASME Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, *Il Nuovo Cimento*), su riviste nazionali, libri e su Atti di conferenze italiane ed internazionali.

In Scopus risultano 70 documenti citati, successivi al 1999, con 245 citazioni e H-index 9.

E' autore del *Capitolo 10* del libro *Environmental Sciences and Environmental Computing*, Vol. II, pubblicato da *the EnviroComp Institute* (Fremont, California, USA) nel 2004, ed è coautore del libro "Sul rischio ondoso nei mari italiani" (Editoriale BIOS, 1999) patrocinato dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) e dal Gruppo Nazionale Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI).

E' Direttore del Laboratorio Naturale di Ingegneria Marittima N.O.E.L. (*Natural Ocean Engineering Laboratory* – [www.noel.unirc.it](http://www.noel.unirc.it)) dell'Università Mediterranea, sul lungomare di Reggio Calabria, a partire dal 2009. Presso il NOEL ha diretto numerose attività sperimentali, tra le quali: un esperimento che mirava a verificare un nuovo metodo per la misura dello spettro direzionale in aree costiere, i cui risultati sono riportati nell'articolo [A25], stampato su *Ocean Engineering* (v. anche [E30]); un esperimento, eseguito in due fasi, che mirava a determinare le pressioni su un parete verticale riflettente in mare, in presenza di onde alte, sia in fase di cresta sia in fase di cavo, i cui risultati sono riportati nell'articolo [A28], stampato su *ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, oltre che in articoli pubblicati su congressi nazionali ed internazionali (v. [D47], [E33], [E34], [E35]); i dati sperimentali dello stesso esperimento sono impiegati anche per la verifica della teoria di quasi determinismo al secondo ordine di approssimazione, per onde stazionarie; un esperimento sulle delle forze idrodinamiche su pali verticali in mare, analizzando sia la struttura dei processi forza sia i coefficienti idrodinamici di drag ed inerzia in presenza di onde di mare, i cui risultati sono pubblicati nell'articolo [A27], stampato su *Probabilistic engineering mechanics* (v. anche [D44], [E32]); un esperimento per lo studio delle onde di mare nel dominio spazio-tempo, i cui risultati sono finalizzati alla verifica della teoria di quasi determinismo (v. articolo [A30] [D55]), all'analisi della forza di Froude-Krylov in mare,

alla statistica delle onde nello spazio-tempo; un esperimento sulle forze idrodinamiche su cilindri orizzontali sommersi (tunnel o condotte sottomarine) - v. articolo [A31].

E' stato *Coordinatore del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in Ingegneria Marittima*, presso l'Università 'Mediterranea' di Reggio Calabria, sin dalla sua istituzione, nel maggio 2003 al 2008. Dal 2008 al 2012 è stato *Coordinatore del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in "Ingegneria Marittima, dei Materiali e delle Strutture"*.

Dal 2012 è *Coordinatore del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in "Ingegneria Civile, Energia, Ambiente e Materiali"*.

E' stato Tutor di nove Dottori di ricerca (cicli XIX, XX, XXI, XXII e XXIII): Alessandra Romolo, Diego Pavone, Saveria Meduri, Vincenzo Nava, Giovanni Malara, Antonino Viviano. Alfredo Ascanelli, Viviana Russo, Pasquale Pizzimenti. Tra di essi, l'ing. Alessandra Romolo, vincitrice della Borsa di Studio Internazionale 'Offshore Mechanics Scholarship' per l'anno 2004-2005, assegnata dalla *International Society of Offshore and Polar Engineering* (Cupertino, California).

E' Tutor di otto allievi per il Dottorato di Ricerca in Ingegneria Marittima ( v. pagina web <http://www.noel.unirc.it>, 'PhD program').

E' stato, infine, Tutor di cinque Post Doc in Ingegneria Marittima, presso l'Università Mediterranea.

Fa parte del Consiglio della Scuola di dottorato di ricerca presso l'Università Mediterranea da settembre 2007. Nel mese di gennaio 2008 è stato eletto membro del Comitato Esecutivo della Scuola di Dottorato, di cui ha fatto parte fino a gennaio 2011.

Dal 2012 è nell'**Editorial Board** della rivista "**Probabilistic Engineering Mechanics**", rivista ISI con Impact Factor: 1.245, stampata da Elsevier (<http://www.journals.elsevier.com/probabilistic-engineering-mechanics/editorial-board/> - ISSN: 0266-8920).

Dal 2012 è nell'**Editorial Board della rivista "Disaster Advances"**, rivista ISI con Impact Factor: 2.272, stampata da Environmental Disaster Research Institute, India (ISSN: 2278 - 4543 - <http://www.disasterjournal.net/BoardofMember.php>).

Dal 2013 fa parte dell'Editorial Board della rivista "*Ocean Systems Engineering, an international journal*", stampata da Techno Press, Korea (ISSN: 2093-6702 - <http://www.techno-press.org/?journal=ose&subpage=2#>).

Dal 2007 è nell'Editorial Board della rivista "*The Open Ocean Engineering Journal*", stampata da Bentham Science Publishers (ISSN: 1874-835X - <http://www.bentham.org/open/tooej/index.htm>).

Dal 2013 è nell'Editorial Board della rivista "*Journal of Computational Engineering*", stampata da Hindawi Publishing Corporation (ISSN: 2314-6443 - <http://www.hindawi.com/journals/comp.eng/>).

E' membro dell'Editorial Board della rivista: "*Italian Journal of Engineering Geology and Environment*", dal 2007 ([www.ijege.uniroma1.it](http://www.ijege.uniroma1.it)).

Presso l' *American Society of Mechanical Engineers* (ASME International), "*Ocean, Offshore and Arctic Engineering*" (OOAE) Division (Houston, TX, USA), egli è membro del Comitato Scientifico per il STRUCTURES, SAFETY AND RELIABILITY SYMPOSIUM ( <http://www.ooae.org/ssr-symposium/> ).

E' stato, tra ottobre e novembre 2006, *Visiting Professor* presso la Rice University di Houston (Texas, USA), Civil and Mechanical Engineering Departments, su invito del prof. Pol D. Spanos.

E' stato, tra aprile e maggio 2007, *Visiting Professor* presso la Technical University di Lisbona, Instituto Superior Técnico (Portogallo), dove, su invito del prof. Carlos Guedes Soares, ha tenuto un ciclo di seminari.

E' stato *Visiting Professor* presso la Rice University di Houston (Texas, USA), Civil and Mechanical Engineering Departments, su invito del prof. Pol D. Spanos, nell'aprile 2008 e nel febbraio 2012.

E' risultato vincitore del premio "OMAE 2011 SSR Best paper Award", della *American Society of Mechanical Engineers ASME* (USA), OOAe, per la memoria "Space-Time Extremes in Sea Storms" scritta con F. Fedele (GeorgiaTech, USA) e M.A. Tayfun (Kuwait University), presentata alla conferenza OMAE di Rotterdam.

Nel mese di giugno 2012 e' stato invitato a coordinare, in qualità di Editor, insieme ai colleghi A. Pirrotta e G. Muscolino, uno **Special Issue** relativo ai migliori lavori presentati nella conferenza internazionale 'Stochastic Mechanics'. Lo Special Issue sarà pubblicato da Elsevier, sulla prestigiosa rivista internazionale "**Probabilistic Engineering Mechanics**".

E' membro del Consiglio Direttivo dell'Associazione di Ingegneria Offshore e Marina (AIOM - [http://www.aiom.info/index\\_file/Page521.htm](http://www.aiom.info/index_file/Page521.htm) ), con sede a Milano, a partire dal 2007. Ha promosso l'attivazione, per conto di AIOM, di una sede operativa presso l'Università Mediterranea di Reggio Calabria. La sede è operativa dal mese di settembre 2008.

A partire da dicembre 2010 è Vicepresidente di AIOM.

E' membro, dal 2006, del Consiglio di Amministrazione (in rappresentanza del nodo regionale Calabria e delle Università della Calabria di Cosenza e Mediterranea di Reggio Calabria) di "ImpresAmbiente s.c.ar.l." (<http://www.cct-impresambiente.com/>), **Centro di Competenza Tecnologica nell'ambito dell'Analisi e Prevenzione del Rischio Ambientale (Bando PON Ricerca MIUR 2006), con sede in Basilicata.**

Presso il **Centro di Competenza Tecnologica "ImpresAmbiente s.c.ar.l."** ricopre, dal 2007, il ruolo di **Responsabile di Nodo per la Regione Calabria.**

E' membro del Consiglio di Amministrazione (in rappresentanza dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria) del Consorzio CRATI s.c.r.l. per la Ricerca e le Applicazioni di Tecnologie Innovative (<http://www.crati.it/crati.html>), cui aderiscono, tra l'altro, le tre Università calabresi, l'Università di Roma "Tor Vergata", l'Università di Perugia, il Consiglio Nazionale delle Ricerche, l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Reggio Calabria, 9 settembre 2013.

prof. ing. Felice Arena  
Università 'Mediterranea' di Reggio Calabria  
DICEAM  
Loc. Feo di Vito  
89122 Reggio Calabria

Telefono 0965/875260  
Fax 0965/875412  
Cellulare 3355387968  
E-mail arena@unirc.it  
Webpage: [www.noel.unirc.it](http://www.noel.unirc.it)  
[www.ing.unirc.it/scheda\\_persona.php?id=578](http://www.ing.unirc.it/scheda_persona.php?id=578)

## ALLEGATO

### Memorie scritte in collaborazione tra Università Mediterranea di Reggio Calabria ed ENEA

- i. Arena, F., A. Carillo, V. Laface, G. Malara, A. Romolo, G. Sannino (2012). Extreme waves in the Central Mediterranean Sea for design of offshore wind farms and wave energy devices. *Proc. of the European Seminar OWEMES 2012*, Rome, 199-213.
- ii. Arena, F., Fiamma, V., Laface, V., Romolo, A., Viviano, A., Sannino, G., Carillo, A. (2013) Installing U-OWC devices along Italian coasts, Proc. of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2013-10928), June, 9-14, Nantes, France
- iii. Arena F., Laface V., Malara G., Romolo A., Viviano A., Carillo A., Sannino G. (2013) Wave energy and extreme value analysis in coastal zone in the central Mediterranean sea, oriented to the design of energy harvesters, Proc. of the European Wave and Tidal Energy Conference EWTEC 2013, Aalborg, Denmark, 2-5 September