



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

*Valutazione della produttività di sistemi attivi su struttura galleggiante
per la generazione di energia da moto ondoso*

G. Mattiazzo, E. Giorcelli, D. Poggi



**POLITECNICO
DI TORINO**

Report RdS/2012/173

VALUTAZIONE DELLA PRODUTTIVITÀ DI SISTEMI ATTIVI SU STRUTTURA GALLEGGIANTE PER LA
GENERAZIONE DI ENERGIA DA MOTO ONDOSO

G. Mattiazzo, E. Giorcelli, D. Poggi (Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e
Aerospaziale)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi e valutazioni sul potenziale energetico delle correnti marine

Responsabile del Progetto: Giammaria Sannino, ENEA

Indice

1-Sommario	4
2-Introduzione	6
3-Descrizione delle attività svolte e risultati.....	7
3.1 <i>Analisi dei dati del sistema onda metrico e loro estrapolazione per l'individuazione dei siti con maggior potenziale/Individuazione aree interessate al moto ondoso.....</i>	<i>7</i>
3.2 <i>Acquisizione e analisi di dati sperimentali relativi al moto ondoso di Pantelleria, determinazione delle scattering table e verifica del potenziale energetico</i>	<i>11</i>
3.3 <i>Confronto con i dati sperimentali acquisiti nel sito di Pantelleria.....</i>	<i>15</i>
3.4 <i>Descrizione del sistema ISWEC: identificazione della taglia e dei componenti costitutivi (giroscopio, scafo e generatore elettrico).....</i>	<i>17</i>
3.5 <i>Produttività del sistema ISWEC.....</i>	<i>19</i>
3.6 <i>Ottimizzazione dei parametri di regolazione e funzionamento del sistema ISWEC.....</i>	<i>20</i>
3.7 <i>Produttività annua del sistema ISWEC.....</i>	<i>23</i>
3.8 <i>Stima della produttività di un sistema da 60 kW a Pantelleria.....</i>	<i>24</i>
4-Conclusioni	31
Riferimenti bibliografici	31
Abbreviazioni ed acronimi	Error! Bookmark not defined.

1-Sommario

Le onde marine costituiscono una delle fonti di energie rinnovabili più interessanti e distribuite sul globo. L'energia delle onde può essere considerata un derivato dell'energia solare, attraverso l'azione dei venti.

La potenza ondosa è proporzionale al quadrato dell'ampiezza e al periodo: se consideriamo un'onda atlantica di dimensioni medie con un periodo di 7-10 s e ampiezza di 2 m risulta che il flusso medio di energia per unità di superficie marina è stimabile in 20 kJ/m². Il livello di potenza per unità di lunghezza del fronte d'onda varia dai 25 kW/m nell'Europa del sud (Isole Canarie), fino a 75 kW/m delle coste irlandesi e scozzesi. Nel Mar Mediterraneo infine la potenza disponibile è ancora significativa e varia in un intervallo compreso tra 11 e 4 kW/m. Se consideriamo anche la potenza sfruttabile in acque profonde al largo delle coste europee, la stima delle risorse totali per l'Europa sale a 320 GW.

I vantaggi che si possono ricavare dallo sfruttamento del moto ondoso sono enormi, le onde rappresentano una fonte pulita, il cui sfruttamento ha un basso impatto ambientale, oltre a ciò la variazione naturale delle onde segue il ritmo diurno/notturno periodico della richiesta di energia. I rischi ambientali legati a questo sfruttamento si dimostrano altresì decisamente bassi.

Tutti i sistemi di conversione dell'energia derivata dai moti ondosi finora sviluppati sono stati progettati per operare in condizioni di mare aperto, e sono indirizzati soprattutto al funzionamento negli oceani dove l'altezza delle onde è decisamente elevata. Nel caso dell'Italia le sue coste sono bagnate da onde di piccola altezza se non in casi particolari dovuti alle condizioni climatiche. E' quindi necessario cercare di sviluppare dispositivi che siano in grado di sfruttare caratteristiche differenti dall'altezza delle onde stesse.

L'attività svolta dal Politecnico di Torino ha riguardato lo sviluppo di un sistema di conversione dell'energia del moto ondoso idoneo all'installazione nel Mar Mediterraneo: il dispositivo è caratterizzato da un'architettura meccanica di conversione costituito da un sistema giroscopico collocato all'interno di un galleggiante; tale scelta consente di sfruttare al meglio la pendenza dell'onda piuttosto che la variazione di ampiezza.

I vantaggi della tecnologia ISWEC possono essere così sinteticamente evidenziati:

- progettazione ad hoc per lo sfruttamento delle condizioni dei siti marini dell'area mediterranea:
- Ottimo rapporto delle prestazioni in confronto all'ingombro
- Basso impatto ambientale in quanto non richiede per il suo funzionamento vincoli fissi sul fondale ma solo di un ormeggio.
- Tecnologia completamente portatile: il sistema giroscopico è un "blocco compatto e sigillato" montabile su qualunque galleggiante soggetto al moto ondoso e in grado di ricavare energia dal moto stesso.

Le attività svolte nell'ambito dell'accordo di Collaborazione tra ENEA e Politecnico di Torino sono rivolte alla valutazione della potenzialità di sfruttamento del moto ondoso che si realizza nei mari italiani per la generazione di energia elettrica.

A tale fine le metodologie di modellazione delle caratteristiche del moto ondoso sviluppate da ENEA sono state integrate con le metodologie di modellazione del sistema di conversione dell'energia del moto ondoso ISWEC (Inertial Sea Wave Energy Converter) sviluppato dal Politecnico di Torino.

Dall'integrazione di queste competenze, che afferiscono a discipline limitrofe, si è ottenuta una metodologia complessiva che raggiunge due distinti risultati:

- l'ottimizzazione del sistema di conversione, per adattarlo alle variazioni a breve termine dello stato del moto ondoso.
- l'analisi della produttività sul lungo periodo, ad esempio la produttività annua.

Le descrizioni dello stato di mare, definite nel dominio delle frequenze per tenere conto delle caratteristiche del moto ondoso reale, di tipo non regolare, vengono elaborate per poterle impiegare all'interno di un modello dinamico inserito in un algoritmo iterativo di ottimizzazione.

Se si utilizza una specifica descrizione spettrale dello stato di mare, questo algoritmo è in grado di stimare la massima produttività del sistema di conversione e il relativo set di parametri di regolazione che realizza tale produttività.

L'insieme delle descrizioni delle condizioni di mare che si realizzano su base annua in un determinato sito possono essere raccolte in forma di scattering table. Da questa descrizione di lungo periodo si può ricavare la valutazione della produttività ottenibile con l'installazione di ISWEC nel sito analizzato.

2-Introduzione

L'accordo di Collaborazione tra ENEA e Politecnico di Torino, riguarda le metodologie di stima delle potenzialità di sfruttamento dell'energia del moto ondoso che si realizza nei mari italiani impiegando i sistemi di conversione sviluppati presso il Politecnico di Torino.

Il sistema di conversione oggetto delle attività è denominato ISWEC (Inertial Sea Wave Energy Converter) e il suo principio di funzionamento è basato l'utilizzo di un sistema giroscopico (installato all'interno di uno scafo galleggiante) e in grado di oscillare su un grado di libertà. I suoi parametri di funzionamento comprendono la velocità angolare del giroscopio e le caratteristiche elastiche/viscose dell'accoppiamento tra gruppo giroscopico e generatore elettrico

Le metodologie di stima vengono adattate e utilizzate in diverse fasi:

1. la fase di localizzazione dei possibili siti di installazione, basate sulla stima della distribuzione dell'energia del moto ondoso su base annua lungo le coste italiane
2. la fase di progettazione dei dispositivi, basata sulla determinazione dei parametri caratteristici del moto ondoso e della loro distribuzione su base annua
3. la fase di realizzazione ed impiego di un sistema di controllo che sia in grado di massimizzare l'efficienza del sistema di conversione dell'energia.
4. la fase di analisi della loro produttività.

Le fasi 1, 2 e 4 sono quindi basate sulle distribuzioni statistiche dei parametri caratteristici del moto ondoso su un lungo orizzonte temporale, parametri raccolti in forma di scattering table.

La fase 3 è invece basata sulle caratteristiche istantanee del moto ondoso nel sito di installazione.

In tutte le fasi evidenziate il punto di partenza è costituito dalla descrizione delle caratteristiche del moto ondoso reale, di tipo non regolare.

3-Descrizione delle attività svolte e risultati

3.1 Analisi dei dati del sistema onda metrico e loro estrapolazione per l'individuazione dei siti con maggior potenziale/Individuazione aree interessate al moto ondoso

L'interesse sull'energia del moto ondoso come fonte di energia rinnovabile è in crescita in tutto il mondo. Tale crescente interesse ha portato, negli ultimi dieci anni, ad investire nell'analisi dello stato di mare sulle coste mondiali ed italiane. In particolare la quantificazione della disponibilità energetica da moto ondoso a scala europea può essere citato WERATLAS (Medatlas Group, 2004). Nell'ambito di questo progetto sono state sviluppate le statistiche dell'energia delle onde offshore. Le principali fonti di dati sono state le previsioni effettuate con il modello matematico WAM e i dati altimetrici da satellite ECMWF. Analogamente a WERATLAS è stato sviluppato nel progetto ONDATLAS (Pontes, et al., 2005), un atlante dell'energia per le coste portoghesi, con focus sui 20 metri profondità. Oggi l'attenzione della comunità scientifica è focalizzata anche sulla messa a punto di protocolli per la valutazione dell'efficienza dei WECs e sulle potenzialità dei siti costieri. Nel progetto EUROWAVES (Barstow et al., 2000) sono state messe a punto alcune metodologie per la calibrazione dei dati satellitari. Recentemente un atlante del vento e delle onde, MEDATLAS, del Mar Mediterraneo è stato pubblicato da WEO (Medatlas Group, 2004). E' inoltre da citare il progetto PRIST 2007 (Progetti di Ricerca di Rilevante Interesse Scientifico e Tecnologico) in cui è stata svolta un'utile valutazione dell'energia delle onde lungo le coste italiane (Vicinanza et al. 2010). I principali obiettivi del progetto furono di offrire una stima precisa del potenziale energetico intorno alle coste italiane attraverso la realizzazione di un Atlante della risorsa e di incrementare il know-how su questo tema in Italia. Attraverso l'analisi di questi progetti e dei dati onda metrici delle boe del R.O.N., è stata eseguita una stima dell'energia ondosa nei mari Italiani basata sull'analisi di circa 11 anni di registrazione di 8 boe della Rete Ondametrica Nazionale (ISPRA, <http://www.idromare.it/>).

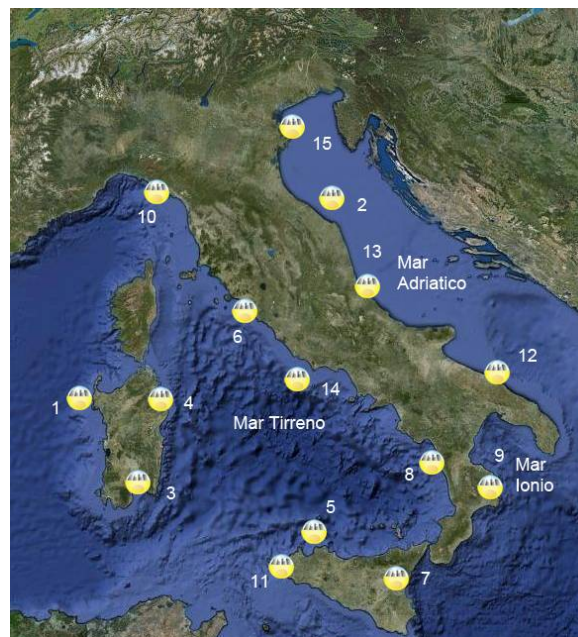


Figura 1. Ubicazione delle boe ondametriche R.O.N. (immagine tratta da [www. idromare.it](http://www.idromare.it/))

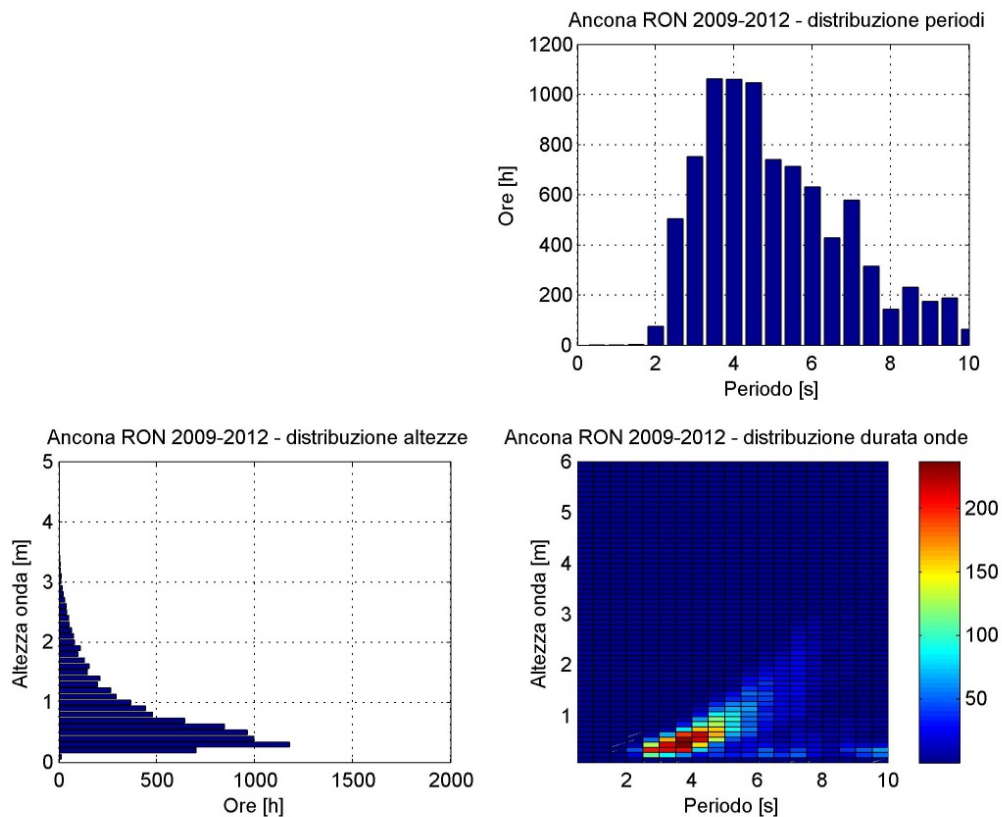


Figura 2. Esempio di analisi di frequenza ed altezza d'onda delle boa ondamiche R.O.N. di Ancona

In figura 2 è riportato un esempio di analisi di frequenza, in funzione di altezza delle onde e periodo, per il sito di Ancona (boa 2 in figura 1). Dall'analisi in frequenza è possibile risalire al potenziale energetico come qui di seguito sinteticamente spiegato. Tutte le boe ondamiche sono ubicate su alti fondali. Per uno stato di mare, la densità media di energia per unità di superficie di un'onda regolare è proporzionale al quadrato dell'altezza d'onda H , secondo la nota relazione:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

con ρ e g rispettivamente densità dell'acqua e accelerazione di gravità.

Il flusso di energia (o potenza del moto ondoso) attraverso un piano verticale di larghezza unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda è pari a:

$$P = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H^2 T$$

Nel caso di moto ondoso irregolare, quando si dispone dell'altezza significativa H_s , calcolata per mezzo del momento di ordine zero delle funzione spettrale, è ancora possibile calcolare la potenza del moto ondoso per mezzo di una equazione formalmente analoga alla precedente a patto di utilizzare come periodo l'energy period T_e , ottenuto per via spettrale come rapporto tra momento di ordine -1 e il momento di ordine zero.

$$P = \frac{1}{64\pi} \rho g^2 H_s^2 T_e \cong \frac{1}{2} H_s^2 T_e$$

dove è stato adottato quale valore della densità dell'acqua $\rho = 1025 \text{ Kg/m}^3$.

Dai dati d'onda (H_s, T_e), misurati ad ogni boa, è stato calcolato il relativo valore di potenza in kW/m. Inoltre è stato calcolato secondo la durata della registrazione (tre ore o mezz'ora) il valore dell'energia in kWh/m per ottenere l'energia totale mensile e annua e successivamente la potenza media mensile e annua.

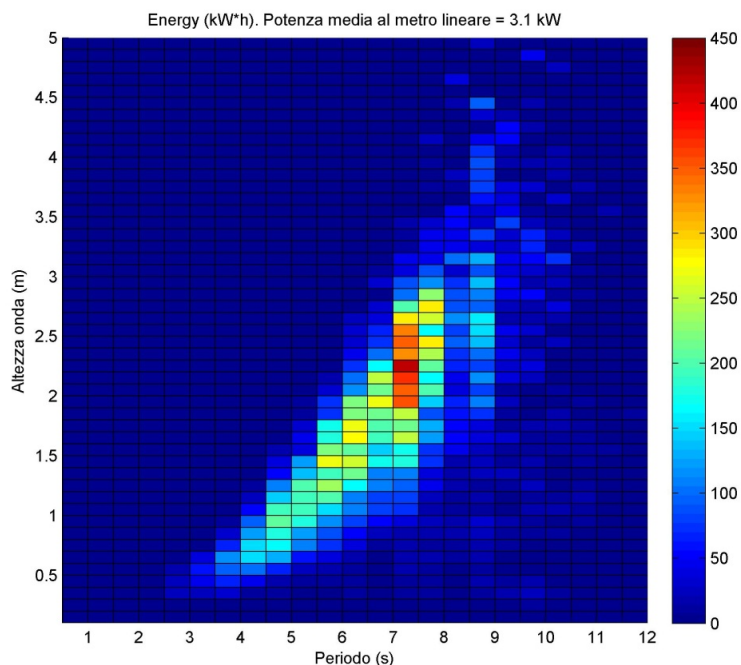


Figura 3. Esempio di analisi energetica, in funzione di frequenza ed altezza d'onda, delle boa ondamiche R.O.N. di Ancona nel mese di Dicembre.

Nella tabella seguente è stata riportata la stima ottenuta della potenza media annuale e mensile per ogni boa.

Boa	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Annuale
	kW/m												
1	12.39	13.43	10.20	10.78	5.85	4.13	4.32	3.68	6.16	7.47	14.83	15.39	9.05
2	2.75	1.24	2.23	1.23	0.69	0.46	0.74	0.66	1.56	1.94	4.49	3.10	1.82
3	1.85	0.91	1.02	1.98	nd	nd	0.57	0.39	0.65	1.40	3.50	2.92	1.52
4	1.91	2.28	2.65	3.30	1.31	0.62	0.55	1.00	1.55	1.12	5.50	7.31	2.43
5	6.11	6.51	5.45	2.86	2.11	1.37	1.42	2.17	2.73	1.15	4.83	9.94	3.89
6	3.71	5.08	3.39	3.41	2.44	0.85	0.90	2.39	0.95	2.69	2.05	6.68	3.10
7	3.11	2.94	3.13	1.96	1.22	0.50	0.44	0.36	0.99	1.67	2.83	3.71	1.90
8	4.31	4.67	4.50	3.32	1.97	1.09	1.01	1.02	1.63	1.64	4.00	5.07	2.85
9	5.00	4.31	3.83	2.93	1.25	0.49	0.50	0.50	1.36	2.69	4.79	6.67	2.86
10	3.96	4.90	3.80	3.86	2.03	1.95	1.92	1.91	3.05	4.00	5.32	4.89	3.46
11	7.16	7.33	5.60	6.68	2.86	1.82	1.44	1.52	2.62	3.46	7.03	9.44	4.75
12	3.56	3.35	3.15	1.73	1.03	0.74	1.04	0.93	1.12	1.81	2.46	3.70	2.05
13	3.30	2.88	2.68	1.58	0.81	0.67	0.69	0.63	1.03	1.37	2.84	4.29	1.90
14	4.77	4.93	3.80	4.18	2.09	1.42	1.81	1.79	3.00	3.01	6.62	6.93	3.70
15	1.67	4.29	2.73	1.23	1.31	1.15	0.56	0.89	1.65	1.38	1.73	nd	1.69

Tabella 1. Potenza media ondosa su base mensile ed annuale alle boe R.O.N..

Il mar Adriatico presenta un valore medio di circa 2 kW/m; come era prevedibile possiede il più basso valore di energia potenzialmente sfruttabile attraverso i WECs.

Il mar Ionio, come il Tirreno medio possiedono livelli energetici lievemente superiori con una media di circa 3 kW/m di potenza ondosa.

Il mar Tirreno inferiore ha un livello energetico medio di circa 4 kW/m.

E' possibile evidenziare che, come si evince dalla tabella, i potenziali energetici maggiori sono quelli relativi alle boe installate in Sardegna e Sicilia.

Sulla base di queste elaborazioni è stato possibile individuare un sito di studio che soddisfacesse alle seguenti condizioni:

- a) buon contenuto energetico del moto ondoso,
- b) esempio di sviluppo energetico sostenibile in cui il moto ondoso potesse giocare un ruolo prioritario,
- c) disponibilità delle amministrazioni locali a collaborare attivamente al progetto.

Uno dei siti individuati è risultato quello di Pantelleria.

In questo sito è stata condotta una campagna sperimentale di misura, descritta nel punto seguente.

In base ai dati rilevati nelle stazioni di misura della Rete Ondametrica Nazionale, il modello numerico elaborato da ENEA ha potuto fornire le caratteristiche del moto ondoso previsto in corrispondenza del sito di Pantelleria.

3.2 *Acquisizione e analisi di dati sperimentali relativi al moto ondoso di Pantelleria, determinazione delle scattering table e verifica del potenziale energetico*

Come descritto in precedenza, al fine di progettare e validare sia lo scafo che il sistema giroscopico si è provveduto, nell'ambito di un precedente progetto (SPOSDET, Regione Piemonte) all'installazione di una stazione sommersa di misura del moto ondoso presso il comune di Pantelleria. Nell'allegato 1 sono riportate le caratteristiche tecniche dello strumento utilizzato (AWAC della NORTEK).

La stazione è posizionata, alla profondità di 16 m, al largo del porto di Pantelleria alle coordinate:

Latitudine $36^{\circ} 50' 2.52''$

Longitudine $11^{\circ} 55' 50.40''$

La campagna di misura è stata iniziata nel Gennaio del 2010 e conclusa nel Dicembre del 2011. Le misure di altezza d'onda sono state realizzate in continuo acquisendo 30 minuti di dati ogni 3 ore ad una frequenza di 2 Hz. Dall'analisi dei dati acquisiti è possibile rappresentare le caratteristiche del moto ondoso e validare i dati, derivanti da modello numerico, forniti da ENEA

Nella Figura 4 è riportata la serie storica dell'altezza delle onde (picco-picco) misurate dallo strumento. Si può notare che le serie storiche non sono continue ma distribuite in quattro blocchi di circa 2 mesi ciascuno. I periodi vuoti sono dovuti all'estrazione dei dati ed alla manutenzione ordinaria dello strumento. Infatti, ogni tre mesi è necessario rimuovere lo strumento dal suo sito di installazione per cambiare le batterie di alimentazione ed estrarre i dati acquisiti.

Dall'analisi qualitativa della figura si evince che l'altezza di picco registrata durante la stagione 2010 è di circa 9 m (febbraio 2010). Inoltre sono numerosi gli eventi meteorologici durante i quali si registrano onde con ampiezze superiori a 4 m.

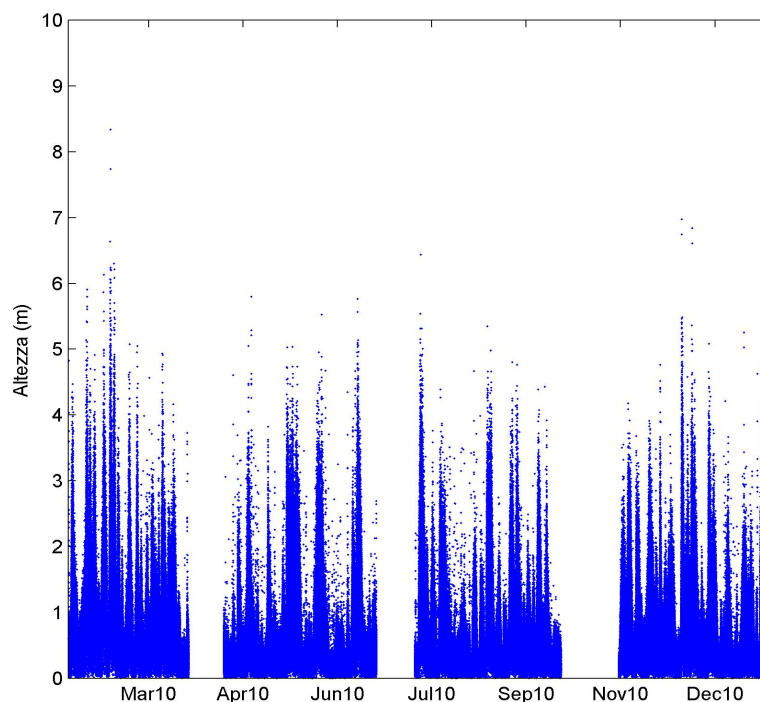


Fig. 4 Esempio della serie storica di altezze d'onda

La stessa rappresentazione viene qui ripetuta in figura 5 riportando l'altezza significativa dell'onda.

Tale rappresentazione è utile per il raffronto con altre stazioni di misura che riportano solitamente non l'altezza picco-picco delle onde ma l'altezza significativa.

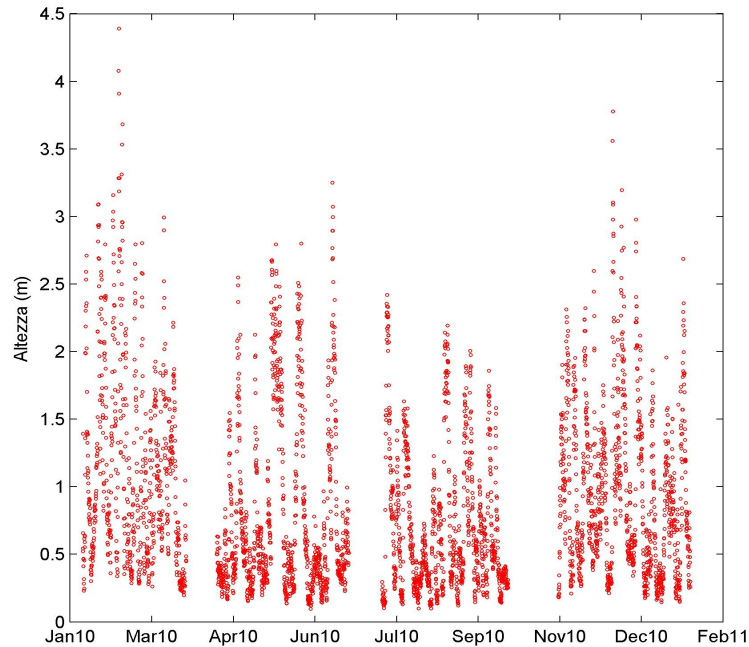


Figura 5. La serie storica di altezze significative

L'informazione sulla correlazione tra la frequenza temporale delle onde e le altezze misurate è riportata nella figura 6.

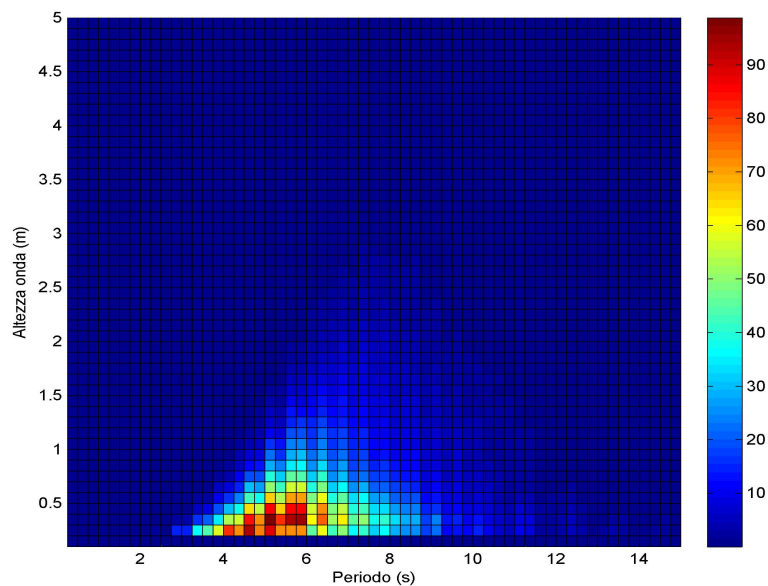


Figura 6. Il numero di ore in funzione del periodo e dell'altezza dell'onda.

Le stesse informazioni possono essere rappresentate quantitativamente con la tabella di ricorrenza (scattering table) riportata in tabella 2:

Ricorrenze [%]		PERIODO [s]											
		1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	10,5	12,0	13,5	15,0	16,5	18,0
ALTEZZA SIGNIFICATIVA DELL'ONDA [m]	5,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
	4,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	3,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,08	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00
	3,0	0,00	0,00	0,00	0,02	0,22	0,21	0,11	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00
	2,5	0,00	0,00	0,00	0,08	0,59	0,52	0,25	0,06	0,04	0,02	0,01	0,01
	2,0	0,00	0,00	0,01	0,46	1,50	1,27	0,52	0,19	0,05	0,03	0,01	0,00
	1,5	0,00	0,00	0,08	2,12	3,66	2,61	1,15	0,35	0,10	0,03	0,02	0,01
	1,0	0,00	0,01	1,14	8,06	7,80	4,67	1,82	0,64	0,20	0,06	0,01	0,01
	0,5	0,01	1,67	13,62	21,15	14,12	5,88	1,69	0,50	0,14	0,04	0,02	0,01

Tabella 2 - Tabella di ricorrenza (percentuale di ricorrenze)

Nella tabella è possibile osservare la percentuale di ricorrenza temporale delle onde in funzione dei suoi due parametri caratteristici (periodo e altezza significativa).

Da questi dati è possibile valutare l'energia delle onde su base annua (per metro di fronte d'onda) sempre in funzione dei suoi due parametri caratteristici.

Energia [Mwh/m/y]		PERIODO [s]											
		1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	10,5	12,0	13,5	15,0	16,5	18,0
ALTEZZA SIGNIFICATIVA DELL'ONDA [m]	5,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,05	0,00	0,02	0,02	0,00	0,03
	4,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,08	0,05	0,02	0,06	0,00	0,00	0,02
	4,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,14	0,07	0,06	0,02	0,04	0,01	0,00
	3,5	0,00	0,00	0,00	0,01	0,19	0,32	0,16	0,10	0,07	0,04	0,00	0,01
	3,0	0,00	0,00	0,00	0,03	0,50	0,57	0,36	0,09	0,04	0,04	0,02	0,01
	2,5	0,00	0,00	0,00	0,09	0,89	0,96	0,55	0,16	0,12	0,06	0,04	0,03
	2,0	0,00	0,00	0,01	0,33	1,38	1,44	0,70	0,30	0,09	0,05	0,02	0,01
	1,5	0,00	0,00	0,02	0,79	1,76	1,53	0,80	0,28	0,09	0,03	0,02	0,01
	1,0	0,00	0,00	0,12	1,16	1,44	1,06	0,49	0,20	0,07	0,02	0,01	0,01
	0,5	0,00	0,02	0,28	0,61	0,52	0,27	0,09	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00

Tabella 3 - Energia delle onde su base annua

Le stesse informazioni sono rappresentate in forma grafica in figura 7, utilizzando il periodo d'onda o la lunghezza d'onda (grandezza equivalente al periodo).

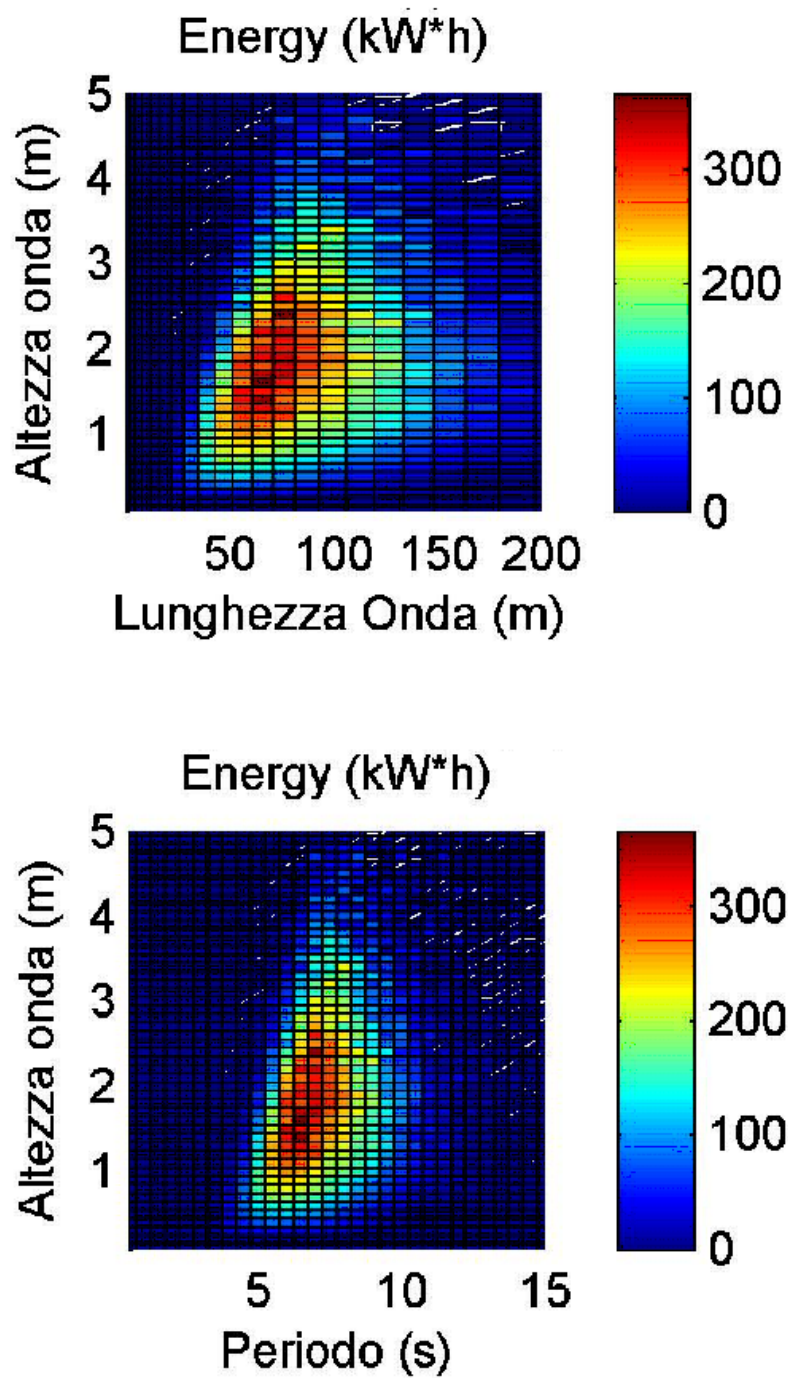


Figura 7. Scattering table dell'energia su base annua per metro di fronte d'onda espressa in funzione di altezza-lunghezza d'onda oppure altezza-periodo.

3.3 Confronto con i dati sperimentali acquisiti nel sito di Pantelleria

Al fine di validare i modelli numerici di ENEA si esegue qui di seguito un confronto tra le onde misurate presso il sito sperimentale di Pantelleria ed i dati fornitici (Figura 8).

Il confronto è fatto sia sovrapponendo le altezze significative sia attraverso una regressione tra le due serie di dati.

Il confronto è sicuramente confortante.

Inoltre, si noti che nel modello utilizzato dall'ENEA la presenza dell'isola non è considerata. Ciò comporta una sovrastima dello stato di mare da parte del modello allorché il vento prevalente sia lo scirocco. Infatti, essendo lo strumento posto a nord-ovest dell'isola, le misure sono fortemente affette dall'effetto di copertura dell'isola stessa sul trasferimento dell'energia ondosa.

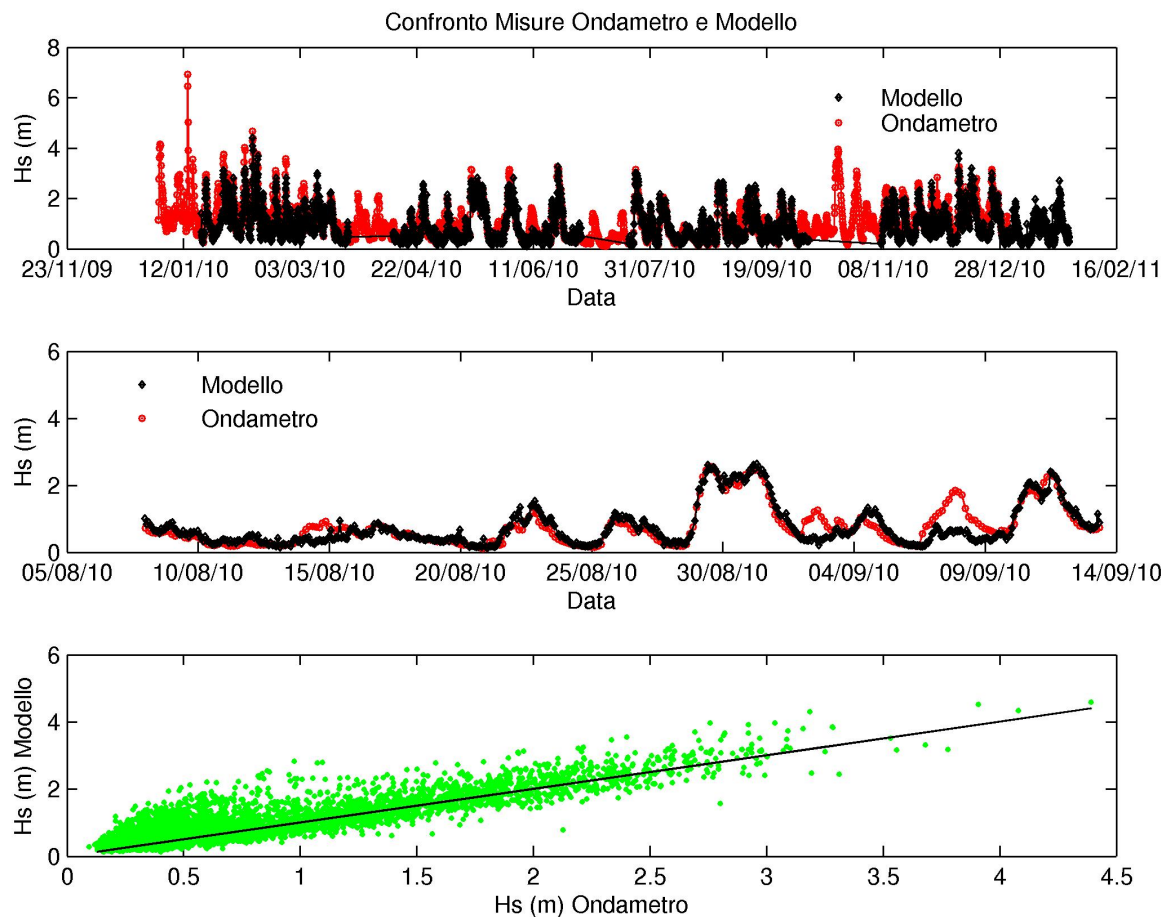


Figura 8. Il confronto tra le altezze significative misurate (cerchi neri) e quelle ricavate dai modelli (cerchi rossi)

Al fine di verificare se l'effetto di copertura dell'isola influenzi significativamente il confronto, nella figura 9 si presenta la stessa analisi di figura 8 ma decurtando dai dati simulati i periodi in cui la direzione del vento prevalente è sud-est. Si noti come, in quest'ultimo caso, la correlazione tra le due serie divenga nettamente migliore. Negli sviluppi futuri si prevede di utilizzare modelli a maglia molto più fitta al fine di tenere in debita considerazione l'effetto di copertura dell'isola sull'energia da moto ondoso.

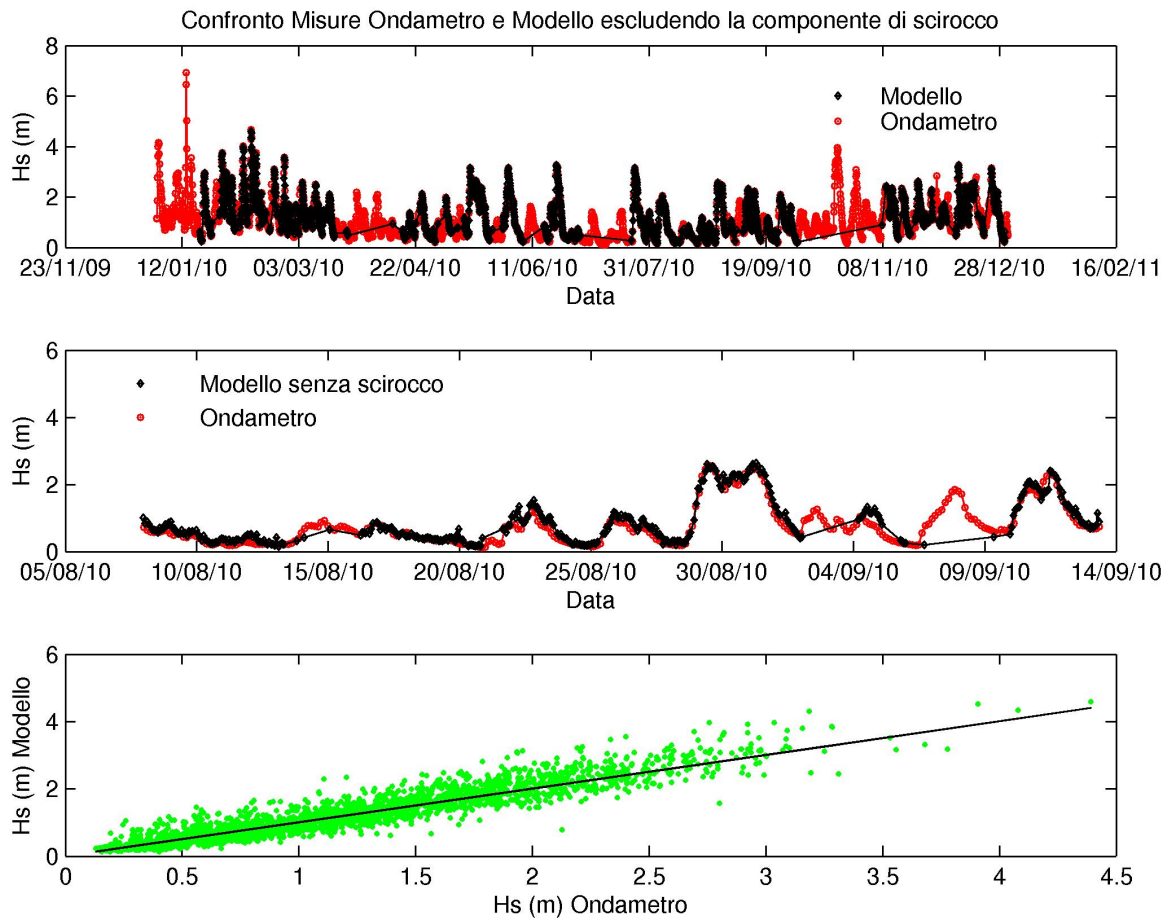


Figura 9. Il confronto tra le altezze significative misurate (cerchi neri) e quelle ricavate dai modelli (cerchi rossi) solo per vento prevalente di maestrale.

3.4 Descrizione del sistema ISWEC: identificazione della taglia e dei componenti costitutivi (giroscopio, scafo e generatore elettrico)

Il sistema di conversione oggetto delle attività è denominato ISWEC (Inertial Sea Wave Energy Converter) e il suo principio di funzionamento è basato sull'utilizzo di un sistema giroscopico installato su uno scafo galleggiante e in grado di oscillare su un grado di libertà rispetto allo scafo.

Lo schema strutturale del sistema è visibile nella figura 10 e deve essere alloggiato all'interno di un opportuno galleggiante.

Lo scafo è caratterizzato da una forma che garantisce l'auto-allineamento con la direzione di incidenza delle onde: questa caratteristica funzionale può essere realizzata con un'opportuna deriva posteriore avente funzione di timone, in grado di generare un momento raddrizzante sull'asse di imbarcata e da opportuni sistemi di ormeggio. In questo modo il moto ondoso incidente indurrà sullo scafo un movimento prevalentemente di beccheggio.

All'interno dello scafo viene alloggiato il convertitore giroscopico che quindi sarà soggetto al moto di beccheggio indotto sullo scafo dalle onde incidenti, rappresentato dalla rotazione δ .

Il giroscopio, sospeso sulla piattaforma a singolo grado di libertà, è caratterizzato da una rotazione propria ad elevata velocità (valori tipici sono 500-2000 rpm) rappresentata dall'angolo φ .

Gli effetti giroscopici, provocati dalla rotazione δ dello scafo, ortogonale alla rotazione propria φ del giroscopio, inducono una rotazione della piattaforma di sospensione del giroscopio attorno al singolo grado di libertà di cui essa è dotata; in questo modo si ottiene la rotazione ε che viene trasmessa al PTO (generatore elettrico) connesso rigidamente all'asse di rotazione della piattaforma di sospensione del giroscopio.

In questo modo il moto periodico delle onde induce un moto periodico di beccheggio dello scafo, che provoca un moto di rotazione alternata dell'albero del PTO, con un trasferimento di potenza meccanica dal moto ondoso allo scafo e quindi al sistema giroscopico, fino ad arrivare al PTO incaricato della trasformazione finale in potenza elettrica.

Con riferimento alla figura 10, in sintesi: l'onda incidente di prua induce il moto di beccheggio δ ; $\dot{\delta}$. Tale moto di beccheggio si combina con la velocità angolare $\dot{\varphi}$ del giroscopio e genera un moto di precessione ε e una coppia di precessione T_ε lungo l'asse del generatore.

I parametri di regolazione sui quali è possibile agire per l'ottimizzazione della potenza sono:

1. c Smorzamento torsionale imposto all'albero del generatore (controllo potenza attiva)
2. k Rigidezza torsionale imposta all'albero del generatore (controllo potenza reattiva)
3. $\dot{\varphi}$ Velocità di rotazione del giroscopio

I parametri di controllo intervengono in diversi punti del sistema: due sono impostati sul driver di controllo del generatore (c , k) e il terzo sul motore del giroscopio (velocità di rotazione $\dot{\varphi}$).

La coppia scambiata tra generatore elettrico e gruppo giroscopico è pari a $T_\varepsilon = k\varepsilon + c\dot{\varepsilon}$ e la potenza meccanica in ingresso al generatore è pari a $P_{gen} = T_\varepsilon \cdot \dot{\varepsilon}$.

La perturbazione del moto del giroscopio, provocata dalle onde che inducono il moto di beccheggio δ ; $\dot{\delta}$ dello scafo, genera una reazione T_δ lungo l'asse di beccheggio, che si oppone al moto di beccheggio. La potenza assorbita dallo scafo è pari a $P_{scafo} = T_\delta \cdot \dot{\delta}$ e rappresenta la potenza estratta dal moto ondoso, che risulta attenuato a valle del sistema ISWEC.

Il moto di beccheggio δ ; $\dot{\delta}$ dello scafo è dato dall'equilibrio dinamico tra le azioni esercitate dal moto ondoso sullo scafo e le coppie esercitate dal gruppo giroscopico sullo scafo T_ε e T_δ .

La regolazione dei due parametri c e k impone quindi la legge di riferimento della coppia del generatore elettrico e agiscono quindi sulla conversione dell'energia da meccanica ad elettrica.

Il parametro $\dot{\varphi}$ agisce viceversa sulle caratteristiche dinamiche dell'intero sistema di conversione ed è un parametro che influisce sulla frequenza di massima risposta quando questo viene sollecitato da un'onda: la

sua variazione seguirà, di fatto, la variazione della lunghezza d'onda che incide sullo scafo, consentendo ad ISWEC l'adattabilità su diverse lunghezze d'onda incidente.

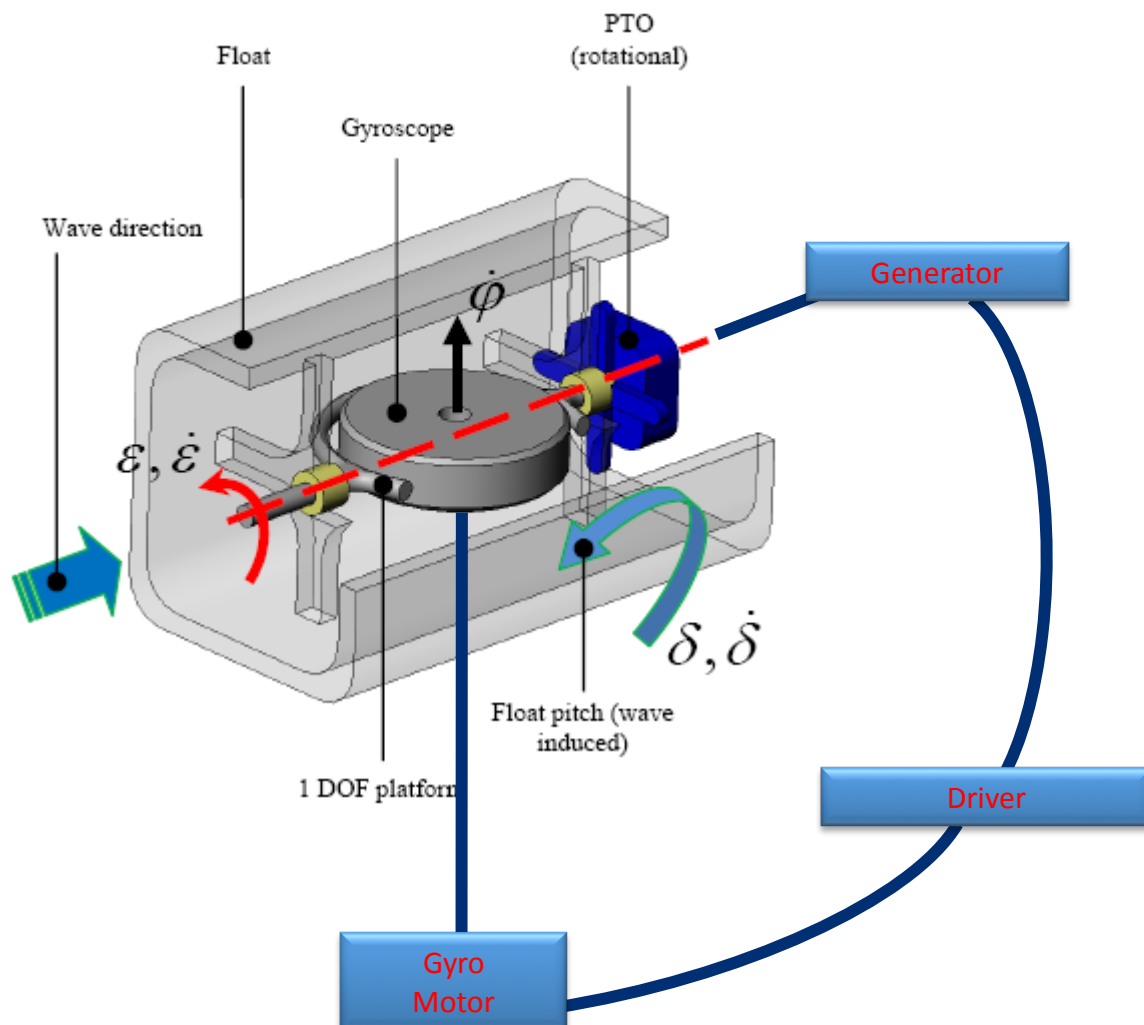


Fig. 10 - Schema di insieme del sistema ISWEC.

3.5 Produttività del sistema ISWEC

Definito così il sistema ISWEC (tramite le equazioni del moto dei suoi componenti), assegnati i parametri di controllo ($c, k, \dot{\varphi}$), e assegnati i parametri caratteristici del moto ondoso è possibile procedere al calcolo della produttività del convertitore ISWEC.

Lo schema a blocchi del modello è riportato in figura 11. Assegnata la condizione ondosa in ingresso il modello determina l'azione dell'onda sullo scafo. Tale azione è quella che trasferisce energia dal mare al sistema.

Il modello tiene conto della dinamica dello scafo e valuta le azioni trasmesse dallo scafo al giroscopio.

Il blocco relativo alla dinamica del giroscopio riceve le azioni dallo scafo, la coppia T_ε imposta al generatore, stima la potenza meccanica trasferita al generatore e la reazione T_δ indotta sullo scafo.

Tali coppie sono importanti perché se eccessive possono ridurre eccessivamente l'ampiezza del moto di beccheggio dello scafo, riducendo così l'assorbimento di potenza. La potenza trasmessa al generatore viene convertita in potenza elettrica, il principale output del modello.

Viene altresì controllato il rispetto dei limiti imposti al sistema: la tipologia e il significato di tali limiti verranno illustrati nel seguente punto 3.3.

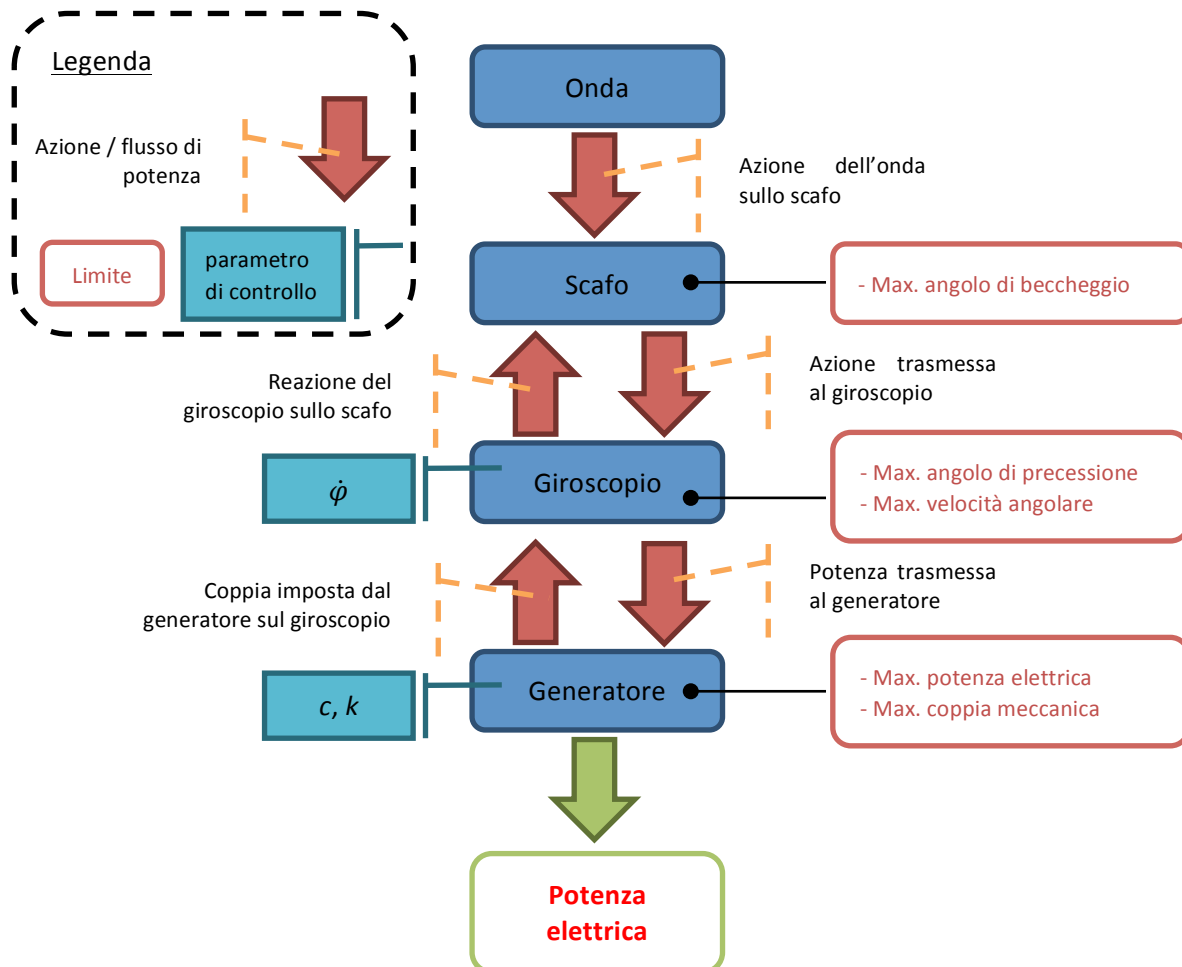


Figura 11 - Schema concettuale del modello e dei limiti usati nella linearizzazione.

3.6 Ottimizzazione dei parametri di regolazione e funzionamento del sistema ISWEC

Una volta che sono stati assegnati i parametri caratteristici del moto ondoso, il metodo di ottimizzazione dei parametri di controllo ($c, k, \dot{\varphi}$) del sistema ISWEC agisce secondo lo schema di figura 12.

Gli input da fornire al metodo sono:

1. Parametri descrittivi dell'onda in ingresso
2. Parametri meccanici del sistema giroscopico
3. Parametri idrodinamici dello scafo

I limiti che devono essere rispettati sono:

1. Limiti di sollecitazione dei componenti meccanici ed elettrici
 - a. Max. potenza elettrica
 - b. Max. coppia meccanica
 - c. Max. velocità angolare giroscopio
2. Limiti di validità del modello
 - a. Max. angolo di beccheggio δ dello scafo
 - b. Max. angolo di precessione ε del giroscopio
3. Limiti di variazione dei parametri di controllo
 - a. c_{min}, c_{max}
 - b. k_{min}, k_{max}
 - c. $\dot{\varphi}_{min}, \dot{\varphi}_{max}$

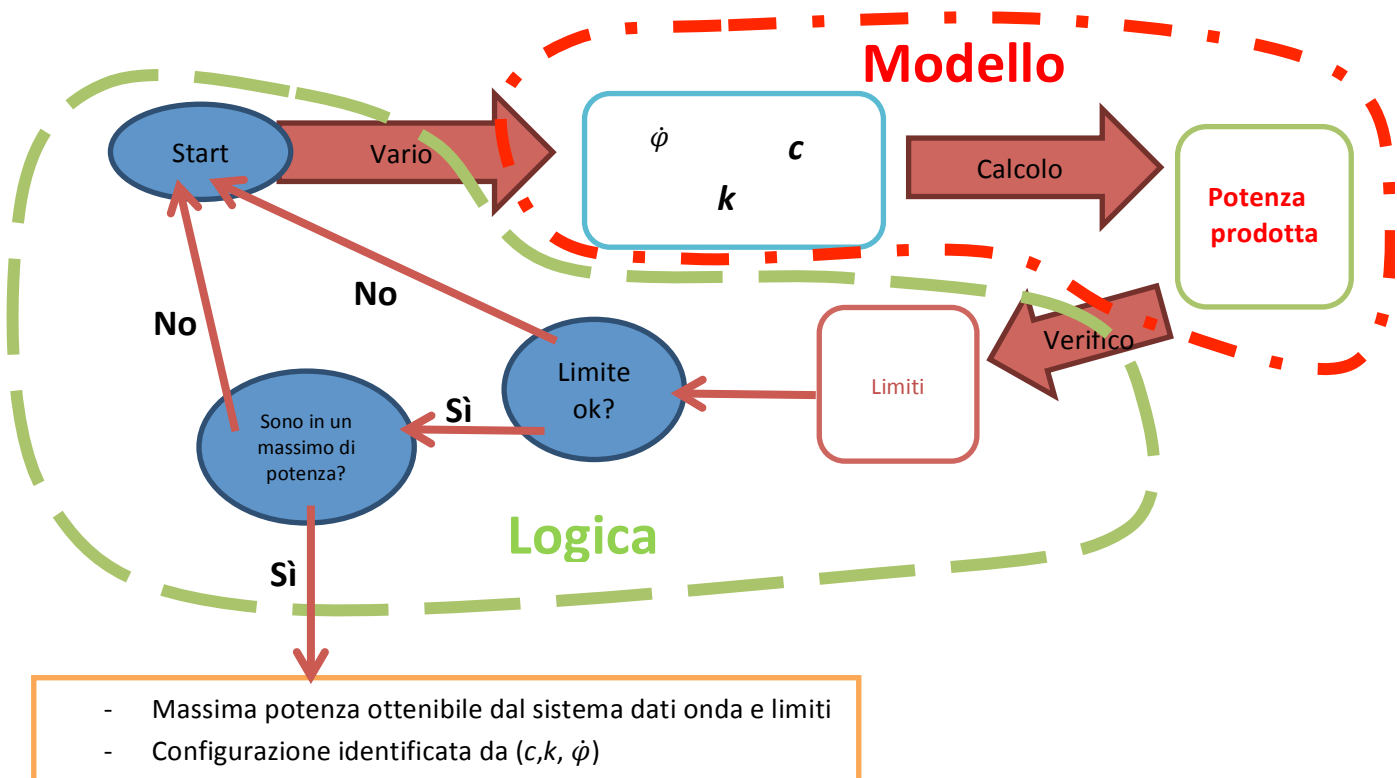


Figura 12 - Schema concettuale del processo di ottimizzazione.

Il procedimento è iterativo ed inizia assegnando una configurazione iniziale dei parametri di controllo $(c, k, \dot{\varphi})$, con cui si può valutare il moto del gruppo giroscopico ε ; $\dot{\varepsilon}$ e il moto di beccheggio dello scafo δ ; $\dot{\delta}$, determinando così la potenza prodotta dal sistema.

A questo punto è possibile procedere con la verifica dei limiti.

Nel caso i limiti non siano soddisfatti, si variano i parametri di controllo per rientrare nei limiti.

Nel caso siano soddisfatti si cerca un massimo di potenza restando all'interno dei limiti e, una volta trovato, l'algoritmo termina fornendo in uscita la potenza prodotta e la configurazione dei parametri di controllo $(c, k, \dot{\varphi})$ necessari ad ottenere tale potenza.

Il modello utilizzato si basa su tre assunzioni principali:

a. Onde regolari di altezza H e periodo T_e

Lo stato di mare reale è di tipo irregolare, frutto della combinazione di onde di varia altezza, frequenza e direzione. Lo stato di mare reale è identificato da due parametri tipici, l'altezza media significativa H_s e il periodo T .

Il periodo fornito in ingresso può essere T_z , lo zero up-crossing period, oppure T_p , il peak period, oppure altri periodi usati in oceanografia e correlati ai primi due.

Se i parametri utilizzati sono H_s e T_z (oppure T_p), ed è noto il tipo di spettro marino (Bretschneider, Pierson-Moskowitz, JONSWAP) è possibile risalire alla forma dello spettro stesso.

Se il tipo di spettro non è noto si può assumere lo spettro di Bretschneider, come da direttive ITTC (International Towing Tank Conference). Noto lo spettro è possibile ricavare l'energy period T_e che rappresenta il periodo a cui è trasmessa l'energia. Il periodo T_e è valutabile dallo spettro come rapporto di momenti spettrali (per dettagli tecnici su come calcolare la densità spettrale di potenza e i momenti spettrali, [1] pag. 78).

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0}$$

Noto T_e si calcola l'altezza H dell'onda regolare equivalente allo stato di mare reale imponendo l'isoenergeticità fra l'onda regolare di altezza H e periodo T_e e lo stato di mare reale esaminato e descritto con i parametri H_s e T_e .

$$\begin{cases} P_{d,reg} = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T_e \left[\frac{W}{m} \right] \cong H^2 T_e \left[\frac{kW}{m} \right] \\ P_{d,irreg} = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \left[\frac{kW}{m} \right] \cong \frac{H_s^2 T_e}{2} \left[\frac{kW}{m} \right] \end{cases} \Rightarrow H^2 T_e = \frac{H_s^2 T_e}{2} \Rightarrow H = \frac{H_s}{\sqrt{2}}$$

b. Modello idrodinamico lineare

L'idrodinamica di un galleggiante è un fenomeno non lineare. E' possibile rappresentare il comportamento idrodinamico di uno scafo tramite un integrale di convoluzione operando nel dominio del tempo oppure tramite l'equazione seguente operando nel dominio delle frequenze:

$$(M + A(\omega))\ddot{X} + B(\omega)\dot{X} + KX = F_E + F_L$$

Dove M è la matrice di massa del dispositivo, A la matrice di massa aggiunta che tiene in conto della massa d'acqua trascinata dallo scafo nel suo movimento, B è la matrice di smorzamento aggiunto, che tiene conto delle azioni dissipative dovute all'onda radiata, K è la matrice di rigidità idrostatica.

A e B non sono costanti, ma funzioni della frequenza dell'onda in ingresso, da cui la non linearità del sistema.

Il vettore X contiene i sei gradi di libertà del galleggiante:

$$X = \begin{Bmatrix} \text{avanzamento} \\ \text{deriva} \\ \text{affondamento} \\ \text{rollio} \\ \text{beccheggio} \\ \text{imbardata} \end{Bmatrix}$$

Il sistema è attivato da due forzanti, F_E che rappresenta la forza esercitata dalle onde sul galleggiante e F_L che tiene in conto delle reazioni che il sistema giroscopico trasferisce al galleggiante. ω rappresenta la pulsazione della forzante (ovvero l'onda).

$$F_E = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{Bmatrix} \cdot H \cdot \sin(\omega t) \quad F_L = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \left(J\dot{\phi}j\omega - \frac{J^2\dot{\phi}j\omega^3}{k - J\omega^2 + cj\omega} \right) X(5) \\ \frac{(J\dot{\phi}\omega)^2}{k - J\omega^2 + cj\omega} X(5) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

c. Modello del giroscopio lineare

Il comportamento del giroscopio è descrivibile dall'equazione non lineare:

$$I\ddot{\varepsilon} - J\dot{\phi}\dot{\delta} \cdot \cos \varepsilon + (I - J)\dot{\delta}^2 \sin \varepsilon \cos \varepsilon = T_\varepsilon = k\varepsilon + c\dot{\varepsilon}$$

Tale equazione può essere linearizzata considerando piccole oscillazioni attorno all'asse ε ($\cos \varepsilon = 1$) e la potenza ottenibile dal sistema è scrivibile nella seguente forma:

$$P_d = \frac{c}{2} \omega^2 \varepsilon_0^2 = \frac{c}{2} \cdot \frac{(J \cdot \omega^2 \cdot \dot{\phi} \cdot X(5))^2}{(k - J \cdot \omega^2)^2 + c^2 \cdot \omega^2}$$

L'output principale del sistema è rappresentato da questa potenza, che viene massimizzata dalla logica di controllo.

La precedente procedura iterativa è implementata in ambiente Matlab

3.7 Produttività annua del sistema ISWEC

Con i metodi precedentemente descritti è possibile procedere al calcolo della produttività del convertitore ISWEC e alla sua massimizzazione per ogni condizione di moto ondoso.

Definito l'intero clima di mare annuale sotto forma di scattering table, è possibile stimare la produttività annuale del sistema.

Per ogni elemento della scattering table il modello valuta la condizione ondosa in ingresso al sistema ISWEC, procede con l'ottimizzazione dei parametri di controllo (c, k, ϕ) e valuta la potenza erogata.

Nota la ricorrenza di ciascuna condizione di moto ondoso è così possibile calcolare l'energia in tali condizioni. Sommando i contributi relativi alle varie condizioni si ottiene così l'energia globalmente prodotta su base annua.

3.8 Stima della produttività di un sistema da 60 kW a Pantelleria

In quanto segue, utilizzando la metodologia illustrata nei paragrafi precedenti, è stata determinata la produttività di un sistema ISWEC della potenza nominale di 60 kW a Pantelleria.

Per la stima della produttività del sistema di conversione dell'energia sono stati usati i seguenti parametri caratteristici per il sistema ISWEC:

Potenza di picco: 150 kW

Coppia di picco PTO: 120 kNm

Momento d'inerzia del volano intorno al suo asse di rotazione $J = 48550 \text{ kgm}^2$

Velocità massima di rotazione del giroscopio $\dot{\varphi}_{max} = 1000 \text{ rpm}$

La struttura del galleggiante è rappresentata in figura 13

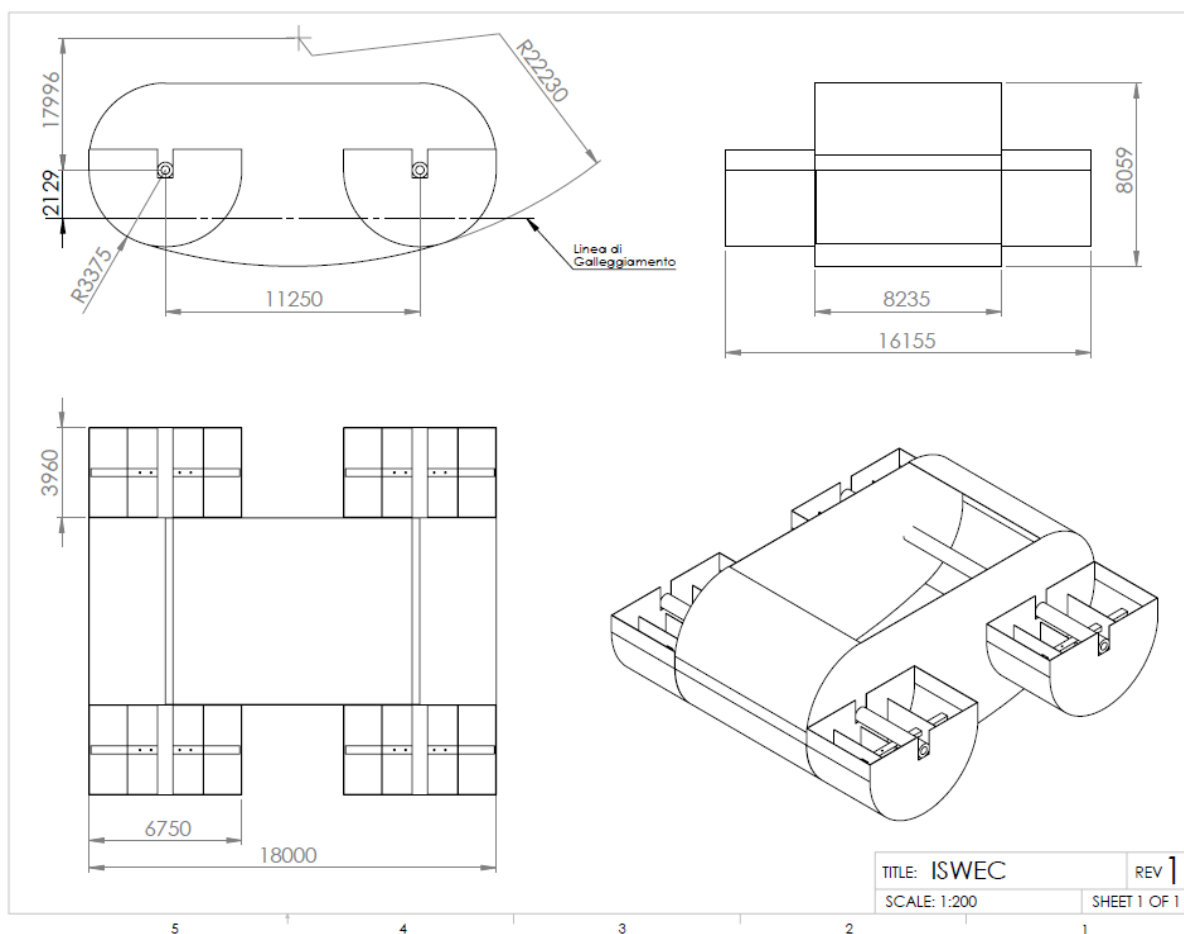


Figura 13 – Rappresentazione dello scafo impiegato per il sistema da 60 kW.

Nelle figure 14 , 15 e 16 vengono riportati i risultati dell'analisi delle onde misurate nel sito di Pantelleria, al fine di quantificare le caratteristiche della risorsa disponibile.

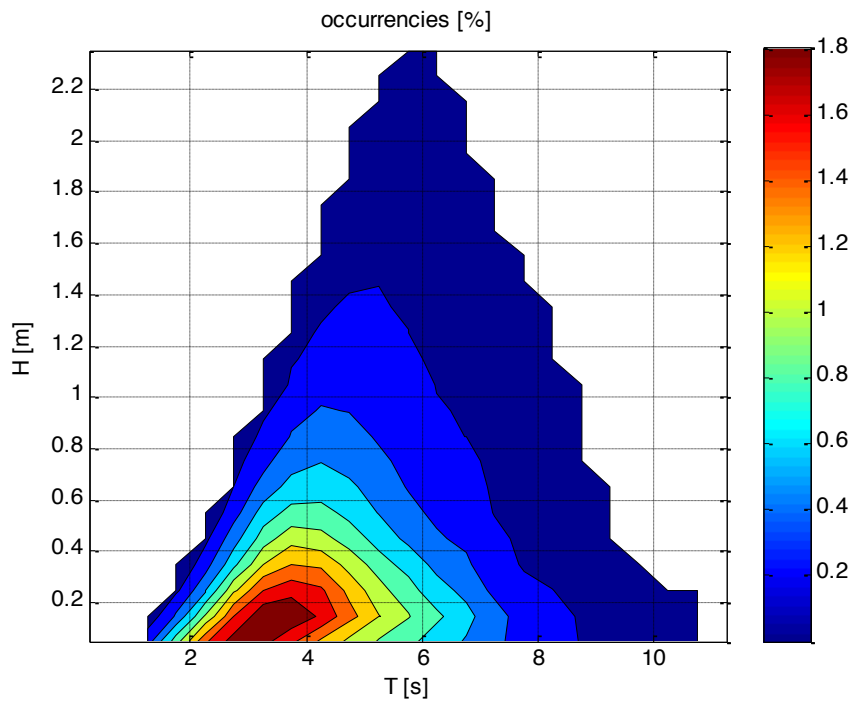


Figura 14 - Scattering table Pantelleria da dati sperimentali

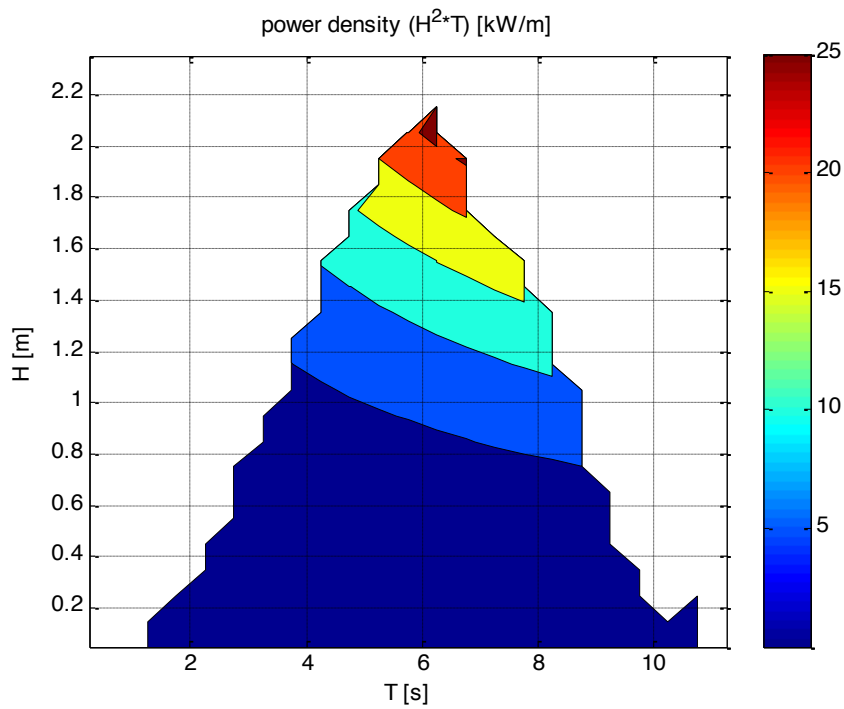


Figura 15 - Potenza ondosa Pantelleria da dati sperimentali

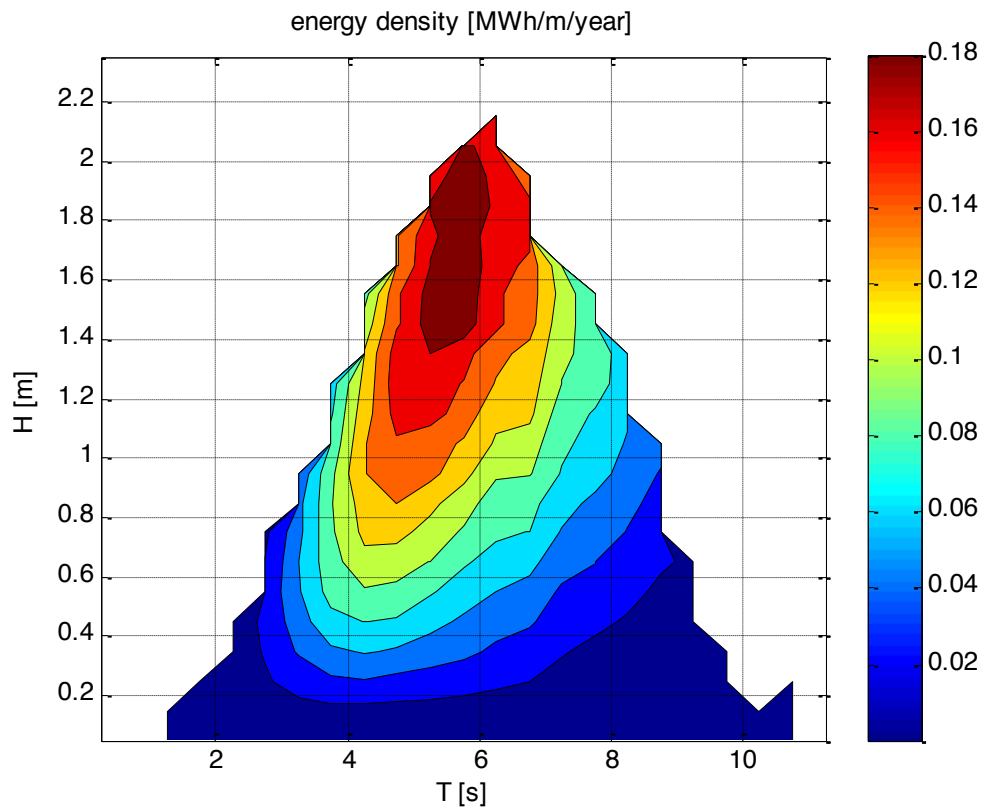


Figura 16 - Energia disponibile su base annua

Gli andamenti sopra riportati di ricorrenza, potenza ed energia del mare di Pantelleria costituiscono l'analisi della fonte disponibile indispensabili per la progettazione del sistema di produzione di energia.

I risultati ottenuti attraverso il processo iterativo di ottimizzazione sono costituiti da:

- Massima potenza che risulta possibile ottenere per ogni condizione di mare considerata, rappresentata in figura 17
- Energia prodotta corrispondente, su base annua, rappresentata in figura 18

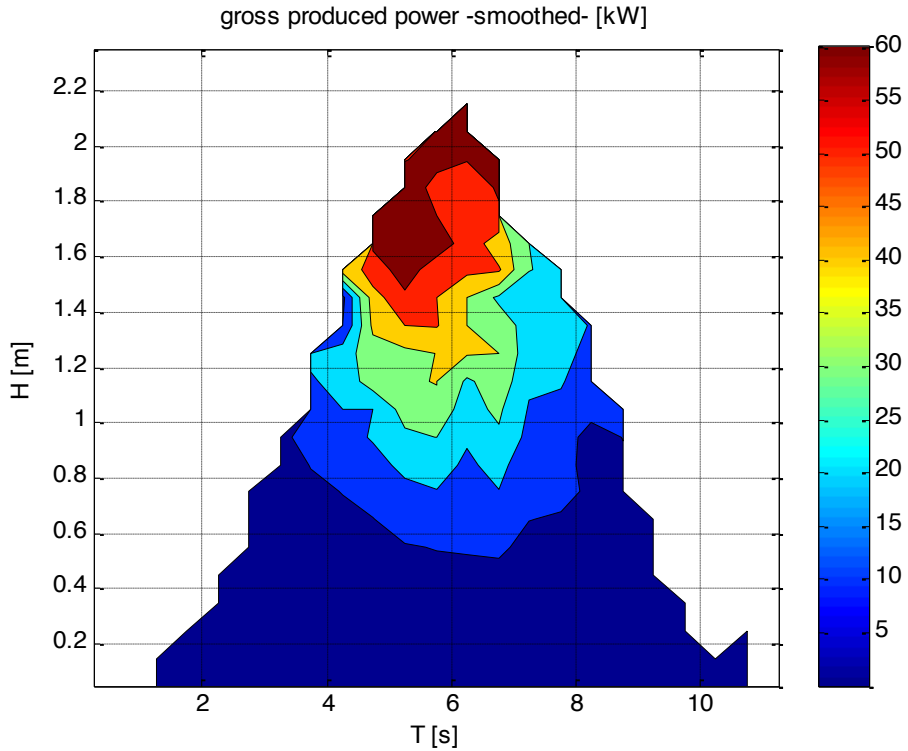


Figura 17 - Potenza prodotta dal dispositivo in ogni condizione ondosa

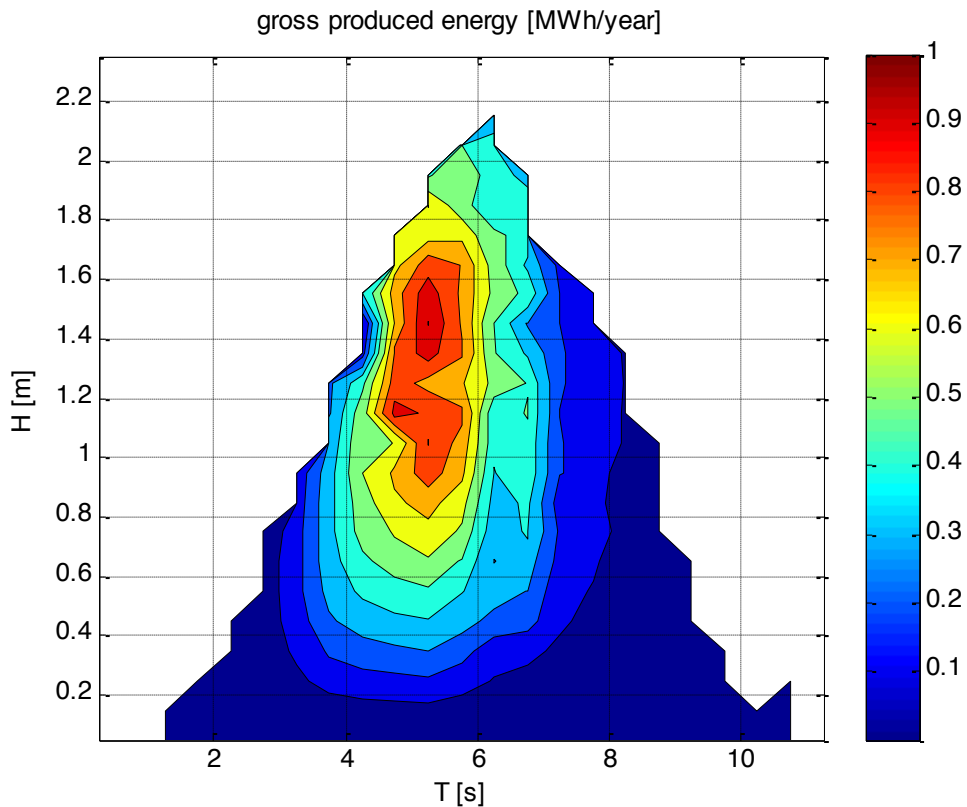


Figura 18 - Energia annua prodotta dal dispositivo

Nelle figure 19 e 20 che seguono vengono riportati parametri di risposta del sistema e i parametri di funzionamento che realizzano l'ottimizzazione della regolazione del sistema.

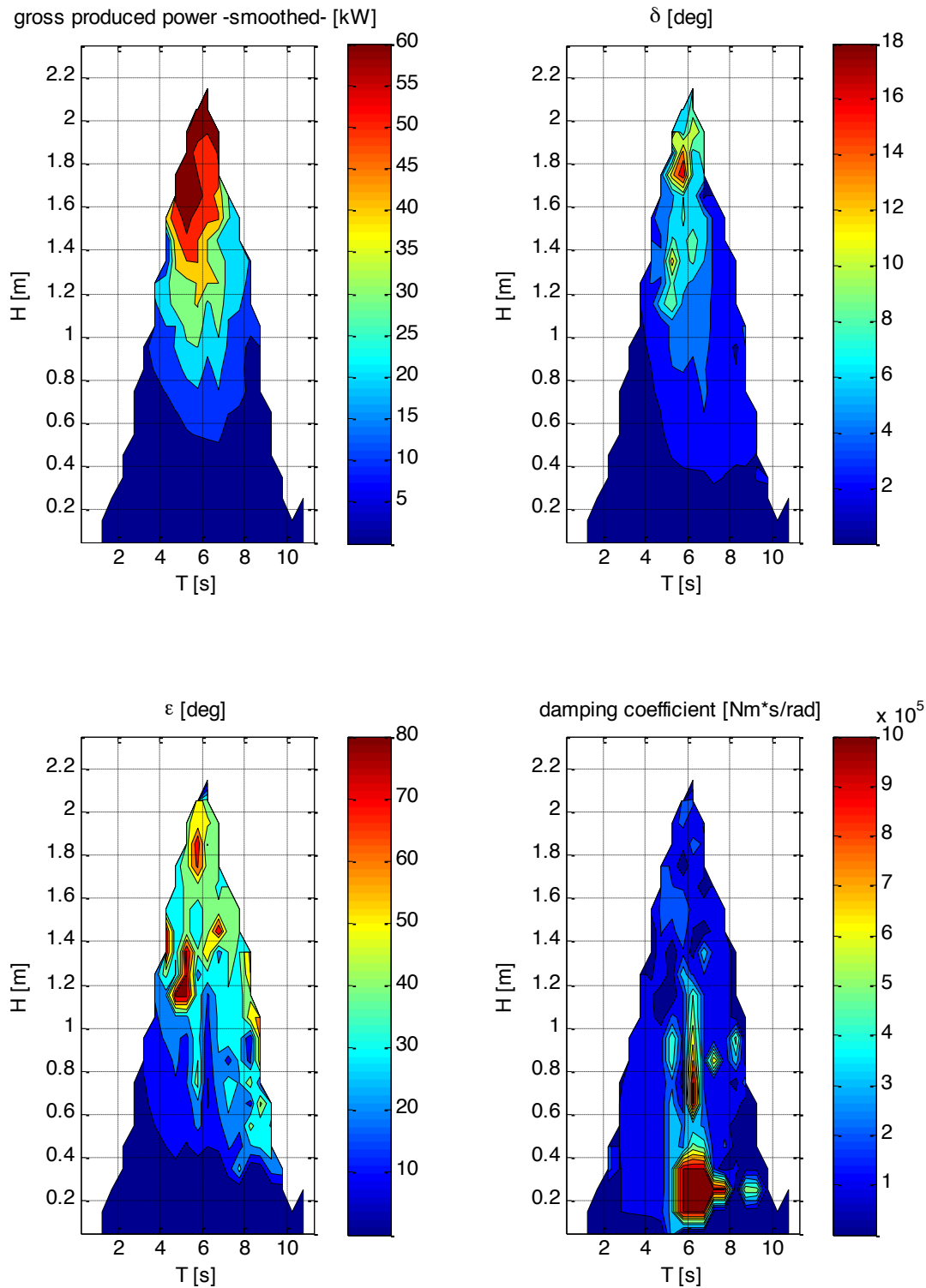


Figura 19 – Parametri di risposta del sistema e parametri di funzionamento ottimizzati.

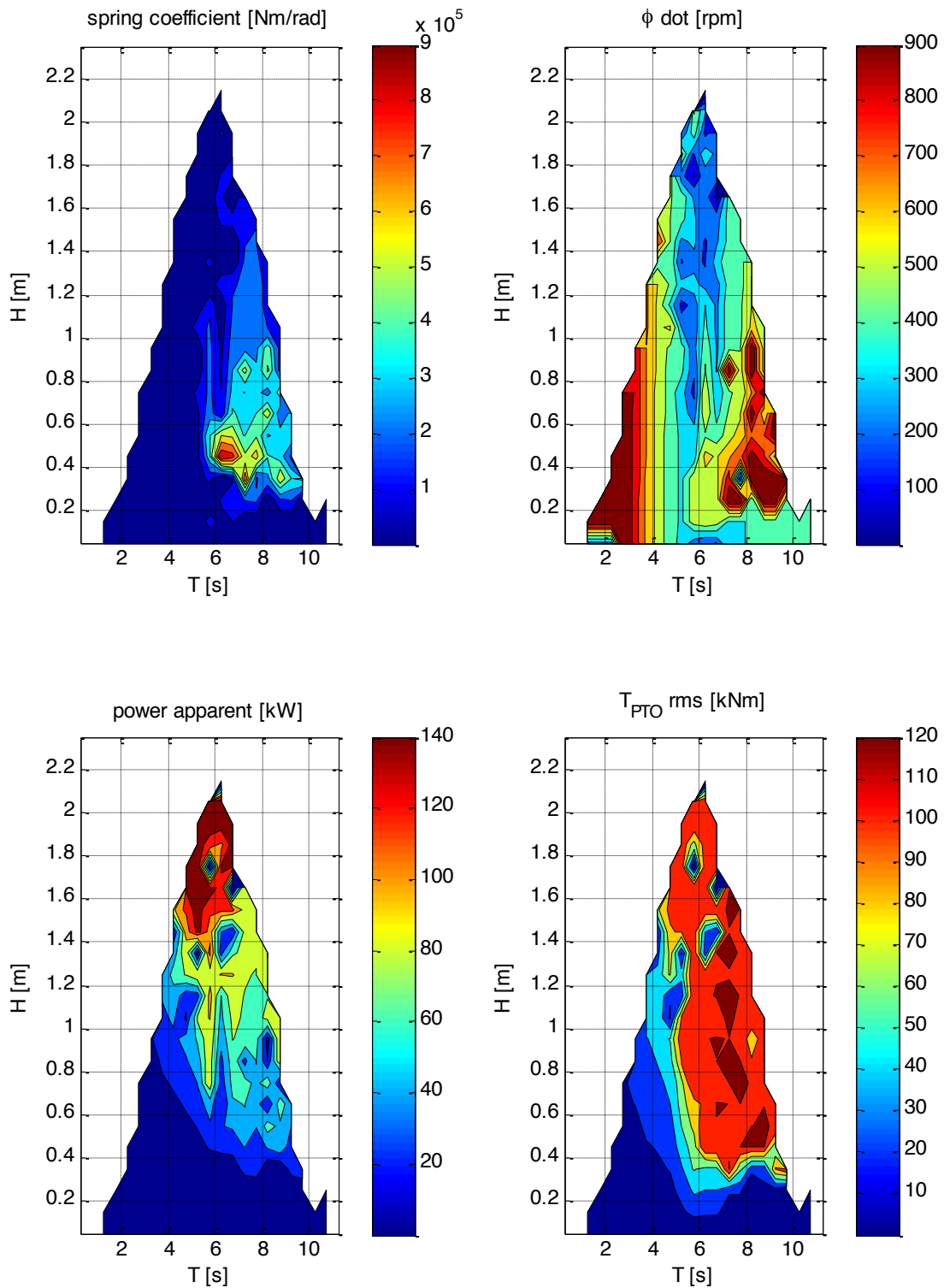


Figura 20 – Parametri di risposta del sistema e parametri di funzionamento ottimizzati.

Risultati:

Il sistema produce una potenza lorda media annuale di 31.5 kW corrispondenti ad un'energia annua lorda prodotta di 276.3 MWh.

I risultati ottenuti sono estremamente incoraggianti e dimostrano la fattibilità dello sfruttamento dell'energia delle onde nel Mediterraneo.

Seguendo l'approccio utilizzato nel lavoro sopra illustrato sarà possibile procedere alla progettazione esecutiva di opportuni dispositivi idonei ai diversi siti di installazione, potendo prevederne, in funzione delle caratteristiche meccaniche e dei parametri descrittivi del moto ondoso, la produttività dell'installazione.

.

4-Conclusioni

Il risultato delle attività consiste nella metodologia sviluppata e nella sua implementazione in ambiente Matlab.

Con il metodo sviluppato è quindi possibile impiegare i parametri caratteristici delle condizioni di moto ondoso su base annua (forniti da Enea) per valutare la produttività del sistema ISWEC sviluppato dal Politecnico di Torino.

E' altresì possibile procedere ad una regolazione del sistema basata su dati di diversa provenienza:

- parametri istantanei (rilevati in loco in tempo reale)
- parametri forniti da una previsione a breve-medio termine delle caratteristiche del moto ondoso (fornita da Enea).

I primi possono essere utilizzati per massimizzare la produttività agendo sui parametri c e k di accoppiamento tra gruppo giroscopico e generatore elettrico, in quanto la loro regolazione è pressoché istantanea e produce effetti con tempi di risposta dell'ordine del periodo dell'onda.

I secondi possono essere utilizzati per la regolazione della velocità angolare $\dot{\varphi}$ del giroscopio, in quanto la dinamica di questa regolazione è molto più lenta (per evitare un inutile sovradimensionamento del motore che porta in rotazione il giroscopio); questo fa sì che la conoscenza di previsioni a breve termine possa essere utilmente integrata nel sistema di controllo/ottimizzazione del sistema ISWEC, al fine di iniziare la regolazione del parametro $\dot{\varphi}$ con il dovuto anticipo in modo tale da garantire l'ottimizzazione dei parametri di funzionamento a fronte di condizioni di moto ondoso non stazionarie di cui però si conoscono previsioni future, senza richiedere sovradimensionamenti dei componenti.

Riferimenti bibliografici

- [1] A. Muetze, J. G. Vining, —Ocean Wave Energy Conversion – A Survey||, IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Vol. 3, pp. 1410-1417, 2006.
- [2] A. Clement, P. McCullen, A. Falcao, A. Fiorentino, F. Gardner, K. Hammarlund, G. Lemonis, T. Lewis, K. Nielsen, S. Petroncini, M. T. Pontes, P. Schild, B. O. Sjostrom, H. C. Sørensen, T. Thorpe, —Wave energy in Europe: current status and perspectives||, Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 6 (5), pp. 405-431, 2002.
- [3] T. Torphe, —A brief review of Wave Energy||, AEA technology for the DTI, Crown copyright, 1999.
- [4] I. Russell, H. C. Sørensen, —Wave Dragon: Results From UK EIA and Consenting Process||, Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Portugal, 2007.
- [5] F. Neumann, A. Brito-Melo, E. Didier, A. Sarmento, —Pico OWC Recovery Project: Recent Activities and Performance Data||, Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Portugal, 2007.
- [6] M. G. de Sousa Prado, F. Gardner, M. Damen, H. Polinder, —Modelling and test results of the Archimedes wave swing||, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, Vol. 220 (8), pp. 855 – 868, 2006.
- [7] M. J. French, —On the difficulty of inventing an economical sea wave energy converter: a personal view||, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, Vol. 220 (3), pp. 149-155, 2006.

- [8] G. Bracco, E. Giorcelli, G. Mattiazzo, —Experimental testing on a one degree of freedom wave energy converter conceived for the Mediterranean Sea||, TMM 2008, Liberec, Czech Republic, 2008.
- [9] G. Bracco, E. Giorcelli, G. Mattiazzo, M. Pastorelli, J. Taylor, —ISWEC: design of a prototype model with gyroscope||, IEEE Conference Proceedings, ICCEP, Capri, Italy, 2009.
- [10] S. H. Salter, —The use of gyros as a reference frame in wave energy converters", The 2nd International Symposium on Wave Energy Utilization, 1982.
- [11] H. Kanki, S. Arii, T. Furusawa, T. Otoyoy, —Development of advanced wave power generation system by applying gyroscopic moment||, Proc. of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference, 2009.
- [12] T. Perez, M. Santos-Mujica, J. P. Ruiz-Minguela, —Performance Analysis and Control Design of a Gyro-based Wave Energy Converter||, Proc. of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference, 2009.
- [13] E. Tedeschi, M. Molinas, "Control Strategy of Wave Energy Converters Optimized under Power Electronics Rating Constraints", 3rd international Conference on Ocean Energy (ICOE10), Bilbao (SP), 6-8 Oct.2010 , pp.1-6
- [14] J. Falnes, —Ocean waves and oscillating systems|| Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
- [15] (2010) ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (the Italian Institute for Environmental Protection and Research) website. [Online]. Available: www.idromare.it
- [16] D. Vicinanza, L. Cappiotti and P. Contestabile, —Assessment of wave energy around Italy||, Proc. of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference, 2009.
- [17] G. Bracco, E. Giorcelli, F. Marignetti, G. Mattiazzo, —ISWEC: application of linear tubular generators||, IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2010), Bari (IT) July 4-7, 2010, pp. 5, pp. 2426-2430, 2010.
- [18] G. Bracco, E. Giorcelli, G. Mattiazzo, —ISWEC: Design of a Prototype for Wave Tank Test||, Proceedings of the ESDA 2010, Istanbul, Turkey, 2010.
- [19] G. Bracco, —ISWEC: a Gyroscopic Wave Energy Converter||, PhD Thesis, Politecnico di Torino, Torino, Italy, 2010.
- [20] W. H. Michel, "Sea Spectra Revisited", Marine Technology, Vol. 36 N.4, pp.211-227, 1999.
- [21] J. Hals, T. Bjarte-Larsson, J. Falnes, —Optimum reactive control and control by latching of a wave-absorbing semisubmerged heaving sphere", Proceedings of the 21th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2002), June 23-28, Oslo, Norway, pp.1-9, 2002.
- [22] M. Stalberg, R. Waters, O. Danielsson, M. Leijon, "Influence of Generator Damping on Peak Power and Variance of Power for a Direct Drive Wave Energy Converter", Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol 130, pp.1-4, 2008.
- [23] M. Ruellen, H. BenAhmed, B. Multon, C. Josset, A. Babarit, A. Clement, "Design Methodology for a SEAREV Wave Energy Converter" , IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.25, No.3, pp760-767, Sept. 2010.
- [24] G.A. Nolan, J.V. Ringwood, W.W. Leithead, S. Butler, "Optimal Damping Profiles for a Heaving Buoy Wave Energy Converter", Proceedings of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, Korea, June 19-24, pp.477-484, 2005.
- [25] J.K.H. Shek, D.E. Macpherson, M.A. Mueller, J. Xia, "Reaction force control of a linear electrical generator for direct drive wave energy conversion||, IET Renewable Power Generation, Vol.1, No.1, pp17-24, March 2007.

- [26] T.K.A. Brekken, A.von Jouanne, Hai Yue Han, "Ocean Wave Energy Overview and Research at Oregon State university", Proceedings of the Power Electronics and Machines in Wind Applications, PEMWA2009, pp.1-7, June 2009.
- [27] G. Bracco, Tesi di Dottorato "ISWEC: a Gyroscopic Wave Energy Converter", 2011

AWAC™

with Acoustic Surface Tracking (AST)

- ✓ **Wave height**
 - ✓ **Wave direction**
 - ✓ **Full current profile**
- ...all with a single instrument**



The Nortek AWAC is a revolutionary instrument that gives you both a current profiler and a wave directional system in one unit. You can measure the current speed and direction in 1-m thick layers from the bottom to the surface and you can measure long waves, storm waves, short wind waves, or transient waves generated by local ship traffic.

The AWAC is designed as a coastal monitoring system. It is small, rugged, and suitable for multi-year operation in tough environments. It can be operated online or in stand-alone mode with an internal recorder and batteries.

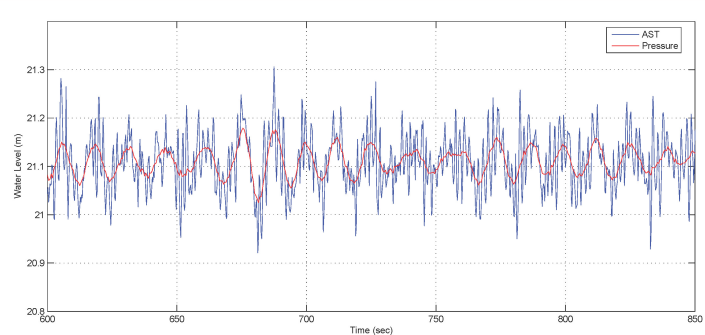
The sensor is usually mounted in a frame on the bottom, protected from the harsh weather and passing ship traffic.

The mechanical design is all plastic and titanium to avoid corrosion. Online systems can be delivered with protected cables, interface units on shore, acoustic modems and backup

batteries. In stand-alone use, the raw data are stored to the recorder, and power comes from an external battery pack. A variety of options are available to achieve your required combination of deployment length and sampling interval.

The AWAC software is used to configure the instrument for deployment, retrieve the data and convert all data files to ASCII, and view all the measured current profiles and wave data. In order to calculate the wave parameters, the non-graphical "Quickwave" software will generate ASCII files with all the interesting wave parameters, "Storm" gives you several graphical views of the processed data, and "SeaState" provides online information.

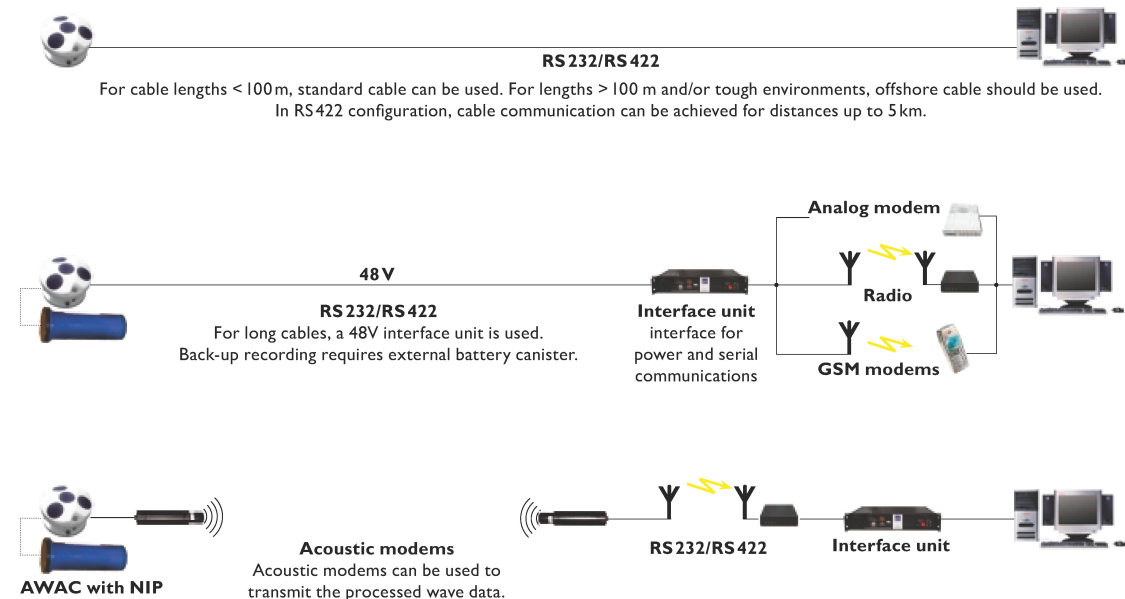
As the plotted time series indicates, both the AWAC's pressure and AST time series capture the long waves. The notable difference is that the AST is capable of measuring the shorter waves superimposed on the longer waves. The AST advantage becomes more relevant and clear as the deployment depths become greater.



www.nortek.no

Online Solutions

AWACs can be deployed for long term monitoring of the local wave and current conditions. Depending on the specific circumstances, Nortek can provide long cables, radio/telephone communication equipment, acoustic modems, etc., that can meet the requirements of your specific project.



NIP- Nortek Internal Processor

The NIP is a micro computer that fits inside the AWAC. It processes the raw wave data to provide estimates of wave height, period, and direction. Reduction of wave data is valuable when considering low bandwidth communications (e.g. acoustic modems).



The NIP is easily configured with the NIPtalk software or the online software SeaState. Data output may be as detailed as full spectral information or simple as basic wave estimates; the output format is either binary or user defined ASCII strings.

NIP Specifications

<i>Memory</i>	25 Mb
<i>Processor</i>	320 MHz
<i>Dimensions</i>	54 X 110 mm

Power Consumption

<i>Active state</i>	600 mW
<i>Low power state</i>	110 mW
<i>Sleep state</i>	10 mW

Modes

Command
Transparent
Master (data streaming)
Polled (request data/measurement)

Data Products (binary or ASCII)

Current Profiles
Sensor data
Wave estimates (Height, Period, Direction)
Energy spectra
Directional spectra
Spreading spectra
Fourier coefficient spectra

Stand-alone Solution

The AWAC can collect data to the internal recorder if it is deployed with an external battery canister. The AWAC software is used to configure the data collection interval for both current profile and wave data.

Typical deployment duration is 1-6 months, depending on the recorder size, battery option and data collection strategy.



AWAC Wave Measurements

Optimized wave data collection measurements begins with a well designed instrument. The AWAC measures three different wave quantities that allow us to arrive the estimates of wave height and wave period. These quantities are pressure, wave orbital velocity, and surface position. The pressure is measured with a high resolution piezo-resistive element. The orbital velocity is measured by the Doppler shift along each beam. The surface position is measured with Acoustic Surface Tracking (AST), a special mode where the instrument acts as an inverted echo sounder.

The fact that waves are a random event requires that measurements are made over defined periods of time, or bursts. Typically these bursts are 512, 1024, or 2048 seconds in length and sampled at 1–4Hz.

The measurement cells and the AST window are adaptively configured during the current profile which immediately precedes the wave burst. The position and size of the velocity cell as well as the AST window are determined based on the minimum pressure. By adaptively configuring the burst measurements, the AWAC not only ensures a maximized signal level and data quality for widely varying wave conditions, but it also permits the AWAC to automatically account for extreme tidal variations.

Wave Processing

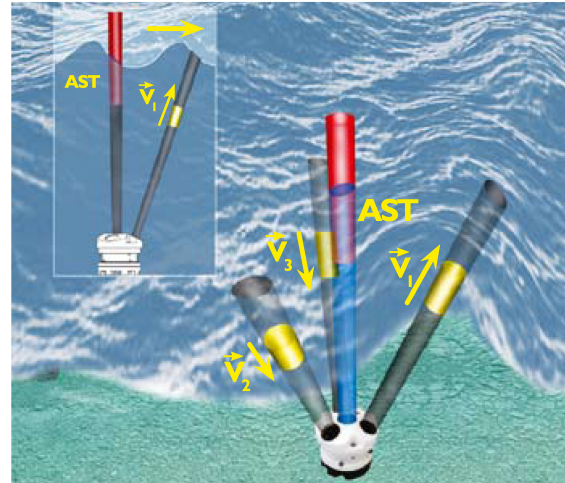
The non directional wave estimates are available from the three independent spectra: pressure, velocity, and AST. The frequency range of these estimates increases respectively: pressure, velocity, AST.

The determination of wave directional estimates is a little more complicated, and may be performed with either the Maximum Likelihood Method (MLM) or a special triplet solution known as the SUV method. The MLM exploits the time-lag between the array of the three spatially separated velocity and AST measurements to determine wave direction.

The solution attempts to determine the direction that provides the best agreement between all four of these measurements. This calculation is performed at discrete frequencies. The end result is a description of the energy distribution in both direction and frequency.

One distinct advantage of using array measurements, is that the method is capable of resolving waves at the same frequency coming from two different directions. One scenario would be identifying incident and reflected waves from a coastal structure.

The SUV approach differs from the MLM approach in the sense that it uses the measurements as a triplet (similar to a wave buoy or PUV instrument). The triplet is composed of the AST and the horizontal velocity estimates of U and V. The advantage of the SUV method is that the AWAC may be mounted on a subsurface buoy allowing it to rotate freely, which is not possible with array solutions like the MLM. The ability to mount the AWAC on a subsurface buoy comes from the fact that the tilt and heading sensors are sampled at a similar rate



The AWAC measures three different wave quantities that allows us to arrive at the estimates of wave height and wave period. These quantities are pressure, wave orbital velocity, and surface position. The pressure is measured with a high resolution piezo-resistive element. The orbital velocity is measured by the doppler shift along each beam. The surface position is measured with Acoustic Surface Tracking (AST), a special mode where the instrument acts as an inverted echo sounder.

as the wave measurements, and as a result these estimates may be converted to an Earth frame of reference.

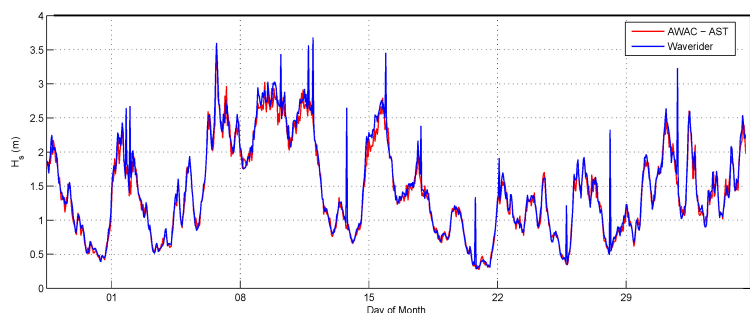
AST defined

For AST it all lies in a dedicated vertical beam where a short acoustic pulse is transmitted by the center beam and the return is finely resolved such that a sub centimeter resolution is achieved.

The AST is not subjected to attenuation as the velocity and pressure signals, so it provides a direct measurement of the free surface. This means that the AWAC is not limited to measuring just the long waves, but all ocean waves. Resolvable wave periods can be as low as 0.5 seconds.

Apart from circumventing the limitations associated with measuring an attenuated quantity, the AST provides a time series of the free surface which allows for enriched data analysis. This includes identifying nonlinear waves, evaluating transient waves (ship wake), and important time series estimates such as H_{max} , H_{10} , T_{mean} , T_{max} , etc. These estimates are unique to AST and cannot be properly determined with just the velocity or pressure measurements. Furthermore, when the AST is included in the MLM solution, the directional estimates becomes much more accurate than without the AST.

Significant wave height estimates compared for the AWAC-AST (red) and the Waverider buoy (blue). Data shows both small and large wave measurement capabilities. Data was collected on the east coast of the UK in 32 meters depth.



Specifications

System

Acoustic frequency	1MHz or 600kHz
Acoustic beams	4 beams, one vertical, three slanted at 25°
Operational modes	Stand-alone or online monitoring

Current Profile

Maximum range	30m (1MHz), 50m (600kHz) (depends on local conditions)
Depth cell size	0.4 – 4.0m (1MHz) 0.5 – 8.0m (600kHz)
Number of cells	Typical 20–40, max. 128
Maximum output rate	1s

Velocity measurements

Velocity range	±10m/s horizontal, ±5m/s along beam
Accuracy	1% of measured value ±0.5 cm/s

Doppler uncertainty

Waves	3.5 cm/s at 1Hz for 2m cells
Current profile	1cm/s (typical)

Wave measurements

Maximum depth	40m (1MHz), 60m (600kHz)
Data types	Pressure, one velocity cell along each slanted beam, AST
Sampling rate (output)	1Hz/2Hz standard, 2Hz/4Hz AST (1MHz), 1Hz standard, 2Hz AST (600kHz)
No. of samples per burst	512, 1024, or 2048

Wave estimates

Range	-20 to +20m
Accuracy/resolution (Hs)	<1% of measured value/1cm
Accuracy/resolution (Dir)	2° / 0.1°
Period range	0.5-30sec

Depth (m)	cut-off period (Hs)	cut-off period (dir.)
5	0.5 sec	1.5 sec
20	0.9 sec	3.1 sec
60	1.5 sec	5.5 sec

Sensors

Temperature	Thermistor embedded in housing
Range	-4°C to 40°C
Accuracy/Resolution	0.1°C/0.01°C
Time constant	<10 min
Compass	Flux-gate with liquid tilt
Accuracy/Resolution	2°/0.1° for tilt <20°
Tilt	Liquid level
Accuracy/Resolution	0.2°/0.1°
Up or down	Automatic detect
Maximum tilt	30°
Pressure	Piezoresistive
Range	0–50m (standard)
Accuracy/Resolution	0.5% of full scale/ Better than 0.005% of full scale per sample

Transducer configurations

Standard	3 beams 120° apart, one at 0°
Asymmetric	3 beams 90° apart, one at 5°

Data Recording

Capacity (standard)	2 MB, expandable to 26/82/154MB
Profile record	Ncells×9 + 120
Wave record	Nsamples×24 + 46

Data Communication

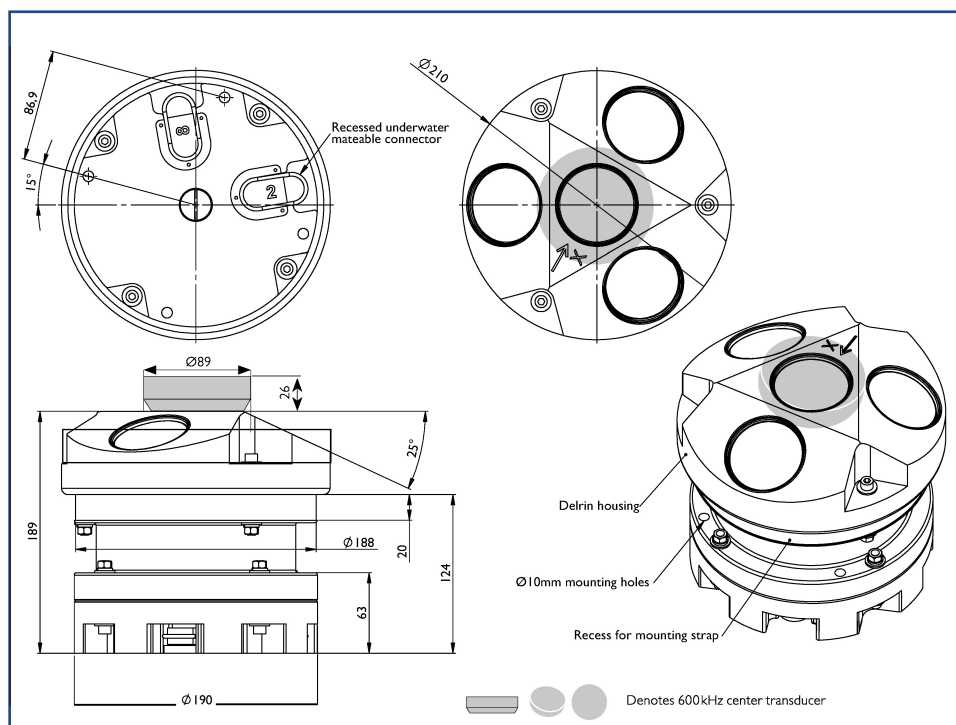
I/O	RS232 or RS422
Baud rate	300–115200, inquire for IMBit
User control	Handled via "AVWAC" software, NIPtalk or ActiveX® controls

Power

DC input	9–16VDC
Peak current	2A
Power consumption	see AWAC software

Offshore Cable

The Nortek offshore cable can, when properly deployed, withstand tough conditions in the coastal zone. In RS422 configuration, cable communication can be achieved for distances up to 5 km.



www.nortek.no

NORTEK AS
Vangkroken 2
NO-1351 Rud
Norway
Tel: +47/ 6717 4500
Fax: +47/ 6713 6770
E-mail: inquiry@nortek.no

青岛诺泰克测量设备有限公司
地址: 中国青岛香港西路65号
汇融广场1302
邮编: 266071

Tel: 0532-85017570, 85017270
Fax: 0532-85017570
E-mail: inquiry@nortek.com.cn

NortekUK
Mildmay House, High St.
Hartley Wintney
Hants. RG27 8NY
Tel: +44- 1428 751 953
Fax: +44- 1428 751 533
E-mail: inquiry@nortekuk.co.uk

NORTEKUSA
222 Severn Avenue
Suite 17, Building 7
Annapolis, MD 21403
Tel: +1 (410) 295-3733
Fax: +1 (410) 295-2918
E-mail: inquiry@nortekusa.com
www.nortekusa.com

