



Ricerca di Sistema elettrico

# Metodologia progettuale di un sistema di produzione di energia da moto ondoso

G. Bracco, E. Giorcelli, G. Mattiazzo, N. Pozzi A. Fontanella,  
E. Giovannini. A. Carillo, G. Sannino



## METODOLOGIA PROGETTUALE DI UN SISTEMA DI PRODUZIONE DI ENERGIA DA MOTO ONDOSI

G. Bracco, E. Giorcelli,, G. Mattiazzo, N. Pozzi (Politecnico di Torino)

A. Fontanella, E. Giovannini, A. Carillo, G. Sannino (ENEA)

Settembre 2016

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

Progetto: B.1.5 Energia elettrica dal mare

Obiettivo: Progettazione di un sistema full scale (denominato PEWEC) per la produzione di energia da moto ondoso (e)

Responsabile del Progetto: G. Sannino (ENEA)

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Progettazione di un sistema full scale (denominato PEWEC) per la produzione di energia da moto ondoso"

Responsabile scientifico ENEA: G. SANNINO

Responsabile scientifico G. Mattiazzo (Politecnico di Torino)

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI .....	5
2.1 IL CONVERTITORE PEWEC.....	5
2.2 MODELLAZIONE MATEMATICA .....	7
2.2.1 <i>Modellazione matematica del pendolo</i> .....	7
2.2.2 <i>Modellazione matematica del pendolo linearizzata</i> .....	8
2.2.3 <i>Modellazione matematica dell'interazione scafo-onda</i> .....	8
2.3 ATTIVITÀ SPERIMENTALE .....	9
2.4 IPOTESI PROGETTUALI .....	10
2.5 ANALISI DELLO SCAFO .....	13
2.5.1 <i>Scafo semicircolare</i> .....	13
2.5.2 <i>Scafo cosinusoidale</i> .....	17
2.5.3 <i>Scafo circolare alleggerito</i> .....	19
2.6 ANALISI DEL PENDOLO .....	25
2.7 ORMEGGIO .....	28
2.8 MODELLAZIONE LINEARE.....	31
2.9 MODELLAZIONE NON-LINEARE .....	41
2.10 SINTESI DELL'ATTIVITÀ DI MODELLAZIONE .....	45
2.11 ANALISI TECNO ECONOMICA .....	47
3 CONCLUSIONI.....	50
4 ACKNOWLEDGMENTS.....	51
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	52
6 APPENDICE .....	53

## Sommario

Nel presente report si mostra la procedura di avamprogetto del convertitore Pewec in scala reale.

Nella prima parte del documento è descritto il modello analitico lineare e non-lineare del sistema Pewec, con riferimento alla sua validazione tramite le prove sperimentali in vasca prova a scala ridotta (1:45) e a scala intermedia (1:12), condotte durante lo svolgimento delle attività previste dall'accordo PAR negli anni 2014 e 2015.

Successivamente vengono identificate le ipotesi progettuali alla base del lavoro. La potenza nominale della macchina di riferimento è pari a 20 kW, il sito di installazione è l'Isola di Pantelleria. Vengono anche valutate le dimensioni principali dello scafo, atte a produrre la potenza desiderata in relazione al clima ondoso del sito di Pantelleria.

A partire dalla ipotesi progettuali, viene svolta un'analisi idrostatica e idrodinamica su tre diverse famiglie geometrie di scafo adatta all'applicazione. Una selezione iniziale permette di scartare alcune delle geometrie ipotizzate, in quanto instabili dal punto di vista statico. Le geometrie stabili vengono studiate dal punto di vista idrodinamico, andando ad adattarne le proprietà inerziali per ottenere una risposta dinamica favorevole al periodo dell'onda di progetto.

A seguire, viene ipotizzata una geometria del pendolo per ogni configurazione di scafo, tenendo conto dello spazio di lavoro disponibile all'interno dello scafo e del periodo di risonanza desiderato, prossimo al periodo dell'onda di progetto.

Una prima analisi con il modello lineare ha permesso di verificare la bontà delle ipotesi effettuate circa il generatore elettrico per il quale vengono rispettati i vincoli di potenza massima e coppia nominale.

Successivamente, visto l'esito favorevole dell'analisi lineare, si è proceduto all'analisi non-lineare, che ha confermato quanto visto preliminarmente e ha dato una valenza quantitativa, fornendo la produttività annua stimata sulla base della tabella delle occorrenze del sito di Pantelleria.

Per poter identificare la configurazione più adatta si è proceduto a un'analisi tecno-economica delle configurazioni di maggior rilievo evidenziate dallo studio di produttività. Si è identificato il parametro LCOE (Levelized Cost Of Energy), che definisce il costo dell'energia in €/MWh, come indicatore atto a identificare la soluzione costruttiva più competitiva.

Infine tale configurazione è stata descritta dal punto di vista geometrico e costruttivo, in modo da poter fornire le linee guida per la successiva progettazione esecutiva del convertitore.

## 1 Introduzione

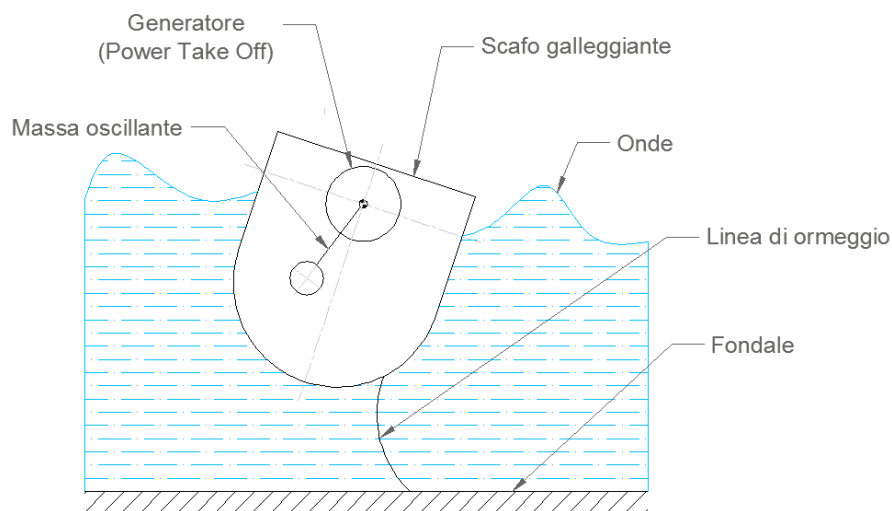
Le attività svolte hanno riguardato l'avamprogetto del convertitore Pewec. A partire dai dati relativi al sito di Pantelleria, si ipotizza una taglia di macchina consona all'applicazione e se ne delineano le caratteristiche principali, utilizzando i modelli sviluppati e perfezionati durante le campagne sperimentali svolte negli anni scorsi nell'ambito dell'accordo PAR.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Il convertitore PEWEC

Il Pendulum Wave Energy Converter è costituito da uno scafo galleggiante, all'interno del quale è presente un pendolo in grado di oscillare rispetto alla sua cerniera. La cerniera è solidale allo scafo e in corrispondenza della medesima è installato un generatore elettrico (detto anche Power Take Off, PTO). Infine lo scafo è tenuto in posizione rispetto al fondale marino mediante una linea di ormeggio.

In Figura 1 è riportato uno schema qualitativo del dispositivo.



**Figura 1: Schema qualitativo PEWEC.**

Per poter descrivere il principio di funzionamento del PEWEC è necessario considerare una rappresentazione piana del sistema, secondo la quale è possibile individuare i tre moti principali del galleggiante (vedi Figura 2:

- *Moto di avanzamento*, parallelo alla direzione dell'onda incidente;
- *Moto di sussulto*, ortogonale alla direzione di avanzamento;
- *Moto di beccheggio*, che corrisponde alla rotazione dello scafo intorno al suo baricentro  $G$ .

L'ipotesi di rappresentazione piana del dispositivo è dovuta al fatto che il sistema è concepito per essere sempre allineato rispetto alla direzione del fronte ondoso.

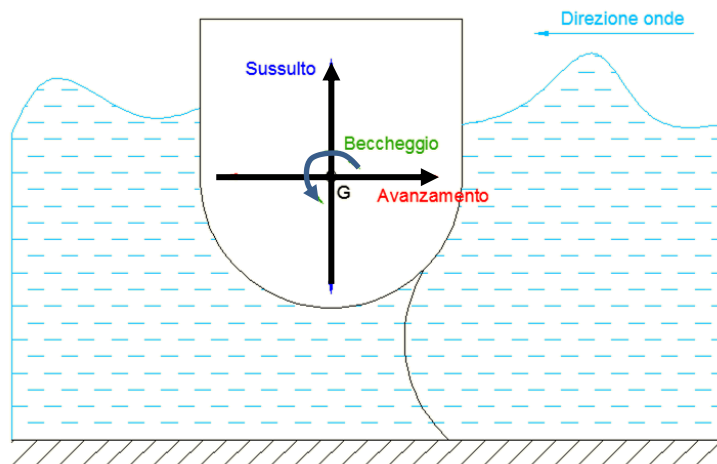


Figura 2: I moti dello scafo

Le onde incidenti sullo scafo inducono il moto dello scafo del PEWEC secondo le direzioni di avanzamento, sussulto e beccheggio precedentemente descritte. La cerniera del pendolo A, che è solidale allo scafo, viene trascinata da quest'ultimo per effetto dei moti di avanzamento, sussulto e beccheggio; il moto della cerniera induce a sua volta l'oscillazione del pendolo, che viene sfruttata per azionare l'albero del generatore elettrico. In Figura 3 sono riportati due schemi che riassumono il principio di funzionamento del PEWEC.

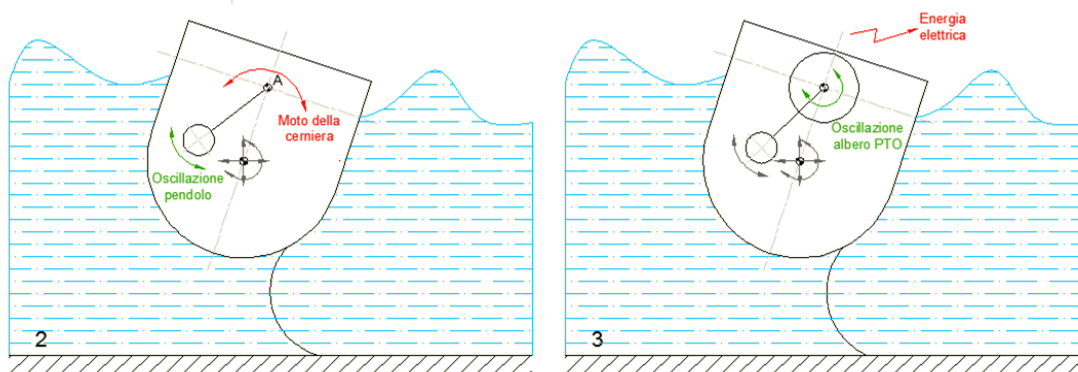


Figura 3: Schema principio di funzionamento PEWEC

## 2.2 Modellazione matematica

Di seguito è descritta la modellazione matematica del convertitore. Si modellano i due sottosistemi principali del convertitore, la dinamica del pendolo e l'interazione scafo-onda.

### 2.2.1 Modellazione matematica del pendolo

Le equazioni dinamiche non lineari del Pendulum Wave Energy Converter sono state derivate applicando l'approccio lagrangiano sui tre gradi di libertà dello scafo ( $x_G, z_G, \delta$ ) e sul grado di libertà interno al sistema  $\varepsilon$  associato al pendolo. Per la loro derivazione le azioni dell'idrodinamica non sono state prese in considerazione, infatti tali effetti verranno introdotti successivamente. Di seguito si riportano le equazioni non lineari della dinamica del sistema in forma matriciale.

$$\mathbf{M} \begin{bmatrix} \ddot{x}_G \\ \ddot{z}_G \\ \ddot{\delta} \\ \ddot{\varepsilon} \end{bmatrix} + \mathbf{D}_{PTO} \begin{bmatrix} \dot{x}_G \\ \dot{z}_G \\ \dot{\delta} \\ \dot{\varepsilon} \end{bmatrix} + \mathbf{K}_{PTO} \begin{bmatrix} x_G \\ z_G \\ \delta \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \mathbf{F}_{cor} + \mathbf{F}_{gr}$$

Dove  $\mathbf{M}$  è la matrice di massa,  $\mathbf{D}_{PTO}$  e  $\mathbf{K}_{PTO}$  sono rispettivamente la matrice di smorzamento e di rigidità associate all'azione del PTO.  $\mathbf{F}_{cor}$  è il vettore dell'azione di Coriolis che nasce per il fatto che la cerniera del pendolo si muove nello spazio, mentre  $\mathbf{F}_{gr}$  è il vettore dell'azione di gravità.

Le espressioni esplicite delle suddette matrici sono riportate di seguito:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_p + m_b & 0 & m_p[d \cos \delta - l \cos(\delta + \varepsilon)] & -m_p l \cos(\delta + \varepsilon) \\ 0 & m_p + m_b & -m_p[d \sin \delta - l \sin(\delta + \varepsilon)] & m_p l \sin(\delta + \varepsilon) \\ m_p[d \cos \delta - l \cos(\delta + \varepsilon)] & -m_p[d \sin \delta - l \sin(\delta + \varepsilon)] & I_y + I_b + m_p(d^2 + l^2) - 2 m d l \cos \varepsilon & I_y + m_p l^2 - m_p d l \cos \varepsilon \\ -m_p l \cos(\delta + \varepsilon) & m_p l \sin(\delta + \varepsilon) & I_y + m_p l^2 - m_p d l \cos \varepsilon & I_y + m_p l^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_{PTO} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_{PTO} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_{cor} = \begin{bmatrix} -m_p \left[ l (\dot{\delta} + \dot{\varepsilon})^2 \sin(\delta + \varepsilon) - d \dot{\delta}^2 \sin \delta \right] \\ -m_p \left[ l (\dot{\delta} + \dot{\varepsilon})^2 \cos(\delta + \varepsilon) - d \dot{\delta}^2 \cos \delta \right] \\ m_p d l \sin \varepsilon \left[ (\dot{\delta} + \dot{\varepsilon})^2 - \dot{\delta}^2 \right] \\ m_p d l \dot{\delta}^2 \sin \varepsilon \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_{gr} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_p g [d \sin \delta - l \sin(\delta + \varepsilon)] \\ -m_p g l \sin(\delta + \varepsilon) \end{bmatrix}$$

### 2.2.2 Modellazione matematica del pendolo linearizzata

Successivamente, considerando l'ipotesi di spostamenti angolari sufficientemente piccoli, le equazioni non lineari sono state linearizzate e dunque semplificate.

Il sistema di equazioni lineari che descrivono il comportamento della meccanica del Pendulum Wave Energy Converter sono le seguenti:

$$\mathbf{M}_{lin} \begin{bmatrix} \ddot{x}_G \\ \ddot{z}_G \\ \ddot{\delta} \\ \ddot{\varepsilon} \end{bmatrix} + \mathbf{D}_{PTO} \begin{bmatrix} \dot{x}_G \\ \dot{z}_G \\ \dot{\delta} \\ \dot{\varepsilon} \end{bmatrix} + \mathbf{K}_{lin}^* \begin{bmatrix} x_G \\ z_G \\ \delta \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{M}_{lin} = \begin{bmatrix} m_p + m_b & 0 & m_p(d-l) & -m_p l \\ 0 & m_p + m_b & 0 & 0 \\ m_p(d-l) & 0 & I_y + I_b + m_p(d-l)^2 & I_y + m_p l^2 - m_p d l \\ -m_p l & 0 & I_y + m_p l^2 - m_p d l & I_y + m_p l^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_{PTO} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_{lin}^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m_p g (d-l) & m_p g l \\ 0 & 0 & m_p g l & k + m_p g l \end{bmatrix}$$

Dove  $\mathbf{M}_{lin}$  è la matrice di massa linearizzata,  $\mathbf{D}_{PTO}$  è la matrice di smorzamento associata all'azione del PTO,  $\mathbf{K}_{lin}^*$  è la matrice di rigidità che contiene sia l'effetto della gravità, sia la rigidità associata alla legge di controllo del PTO.

### 2.2.3 Modellazione matematica dell'interazione scafo-onda

La modellazione idrodinamica di uno scafo soggetto al moto delle onde marine è rappresentabile dalla seguente equazione matriciale:

$$([\mathbf{M}] + [\mathbf{A}(\omega)]) \cdot \{\ddot{x}\} + [\mathbf{B}(\omega)] \cdot \{\dot{x}\} + [\mathbf{K}] \cdot \{x\} = \{F_E\} + \{F_L\}$$

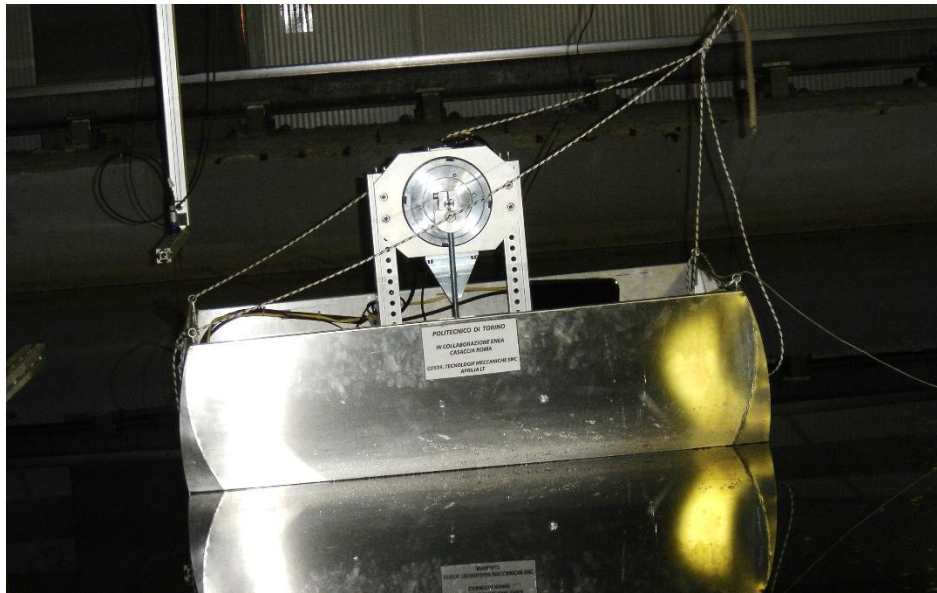
Dove  $\mathbf{M}$  è la matrice di massa del dispositivo,  $\mathbf{A}$ , la matrice di massa aggiunta e  $\mathbf{B}$  la matrice dello smorzamento aggiunto,  $\mathbf{K}$  è la matrice di rigidità idrostatica.  $F_E$  rappresenta il vettore delle forze di eccitazione che le onde esercitano sullo scafo e  $F_L$  il vettore delle forze esterne applicate sullo scafo. In questo caso le forze che il sistema oscillante scambia alla cerniera del pendolo.  $X$  è il vettore posizione dello scafo ed è definito come segue:

$$\{X\} = \begin{Bmatrix} X_G \\ z_G \\ \delta \end{Bmatrix}$$



### 2.3 Attività sperimentale

L'attività di sperimentazione del sistema PEWEC è stata eseguita con modelli in scala 1:45 e in scala 1:12, presso il canale di prova del Politecnico di Torino e la vasca prova del CNR INSEAN di Roma.



**Figura 4: Il prototipo in scala 1:45 in assetto di prova.**



**Figura 5: Il prototipo in scala 1:12 in assetto di prova.**

Il sistema PEWEC ha mostrato efficienze di cattura superiori al 60 % nei test in onda regolare e pari al 40 % per test in onda irregolare. I test sperimentali hanno validato i modelli numerici con l'approssimazione necessaria per svolgere lo studio del sistema full-scale descritto nel presente report.

### 2.4 Ipotesi Progettuali

Il sito considerato per l'installazione è quello dell'Isola di Pantelleria, per il quale il Politecnico di Torino ha provveduto alla misurazione del moto ondoso alle coordinate indicate in Figura 1. La profondità del sito di installazione è pari a 33 m.



Figura 6: Punto di misura (36 49 39N11 55 20 E).

Da tali misurazioni è stato possibile risalire alla tabella delle occorrenze di Figura 7.

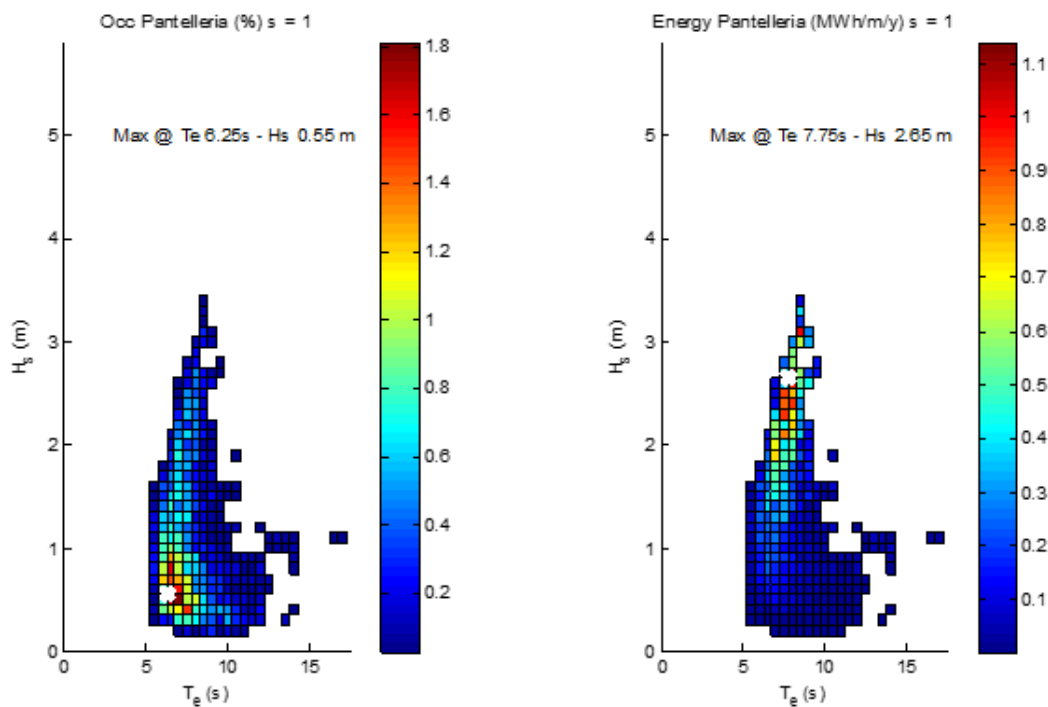


Figura 7: Tabella delle ricorrenze del sito di Pantelleria.

La condizione ondosa di progetto è intermedia fra la condizione di massima energia e quella di massima occorrenza. In analogia a quanto precedentemente svolto per la progettazione del sistema ISWEC è stato scelto il punto identificato dai parametri  $H_s = 1.6$  m,  $T_e = 6.7$  s. Tale condizione di clima ondoso presenta una densità di potenza pari a 8.4 kW/m.

$$\bar{P}_i \cong 0.49 H_s^2 T_e = 8.4 \text{ kW/m.}$$

La lunghezza d'onda di un'onda monocromatica equivalente in tale condizione di progetto è la seguente.

$$\lambda = \frac{g}{2\pi} T_e^2 = 70 \text{ m.}$$

### Dimensioni Scafo

La taglia di potenza scelta per il convertitore è di 20 kW. Questo parametro consente individuare la stima iniziale della larghezza del dispositivo, stimabile con le seguenti ipotesi:

1. Efficienza idrodinamica/meccanica: identifica la quantità di energia meccanica disponibile all'asse del pendolo in relazione all'energia ondosa incidente. Dalle prove sperimentali effettuate sul prototipo in scala 1:12, il valore massimo ottenuto in onda reale è stato pari al 40%. Si ritiene quindi di poter replicare le condizioni ottenute in vasca e si assume il valore del 40% per questo parametro.
2. Efficienza meccanica/elettrica: identifica la quantità di energia elettrica disponibile all'uscita del convertitore in relazione all'energia meccanica disponibile all'asse del pendolo. Tale valore è stimato al 70 %.

Risulta quindi che la larghezza iniziale del dispositivo è pari a:

$$W = \frac{P_{elect}}{\bar{P}_i * \eta_{im} * \eta_{me}} = 8.5 \text{ m}$$

Gli scafi analizzati avranno quindi larghezze nell'intorno di tale valore e fino anche al triplo per poter condurre analisi di sensibilità.

La lunghezza dello scafo è funzione della lunghezza d'onda, in quanto scafi di lunghezza ridotta non sono in grado di trasmettere coppie al sistema pendolo, mentre scafi di larghezza elevata non hanno moto di beccheggio sufficiente. In base alle attività numeriche e sperimentali precedentemente condotte si ritiene di analizzare scafi di lunghezza nel campo 20 – 50 % della lunghezza d'onda di progetto, risultando in valori compresi fra 14 e 35 m.

### Taglia PTO

Il PTO (Power Take Off) è il sistema che converte l'energia meccanica disponibile all'asse del pendolo in energia elettrica. Nel lavoro qui svolto si intende utilizzare un PTO all-electric, composto da un moltiplicatore collegato all'asse del pendolo e atto ad amplificarne la velocità che viene fornita in ingresso a un motore coppia. Il motore è controllato da un inverter rigenerativo, in grado di assorbire la potenza del pendolo e convertirla in potenza elettrica.

La potenza nominale del PTO è funzione della potenza media, e, dall'analisi delle prove sperimentali pari a circa 5.5 volte il valore medio, portando a una potenza nominale del PTO di 110 kW.

La coppia nominale del PTO è ricavabile a partire dalla potenza assumendo una velocità di riferimento di oscillazione dell'asse del pendolo derivante dalle prove sperimentali pari a 30 rpm. La coppia nominale del PTO è quindi pari a

$$T_{PTO} = \frac{P_{PTO}}{\omega} = 35 \text{ kNm}$$

Si ipotizza di utilizzare un rapporto di moltiplicazione pari a 10, per cui la coppia nominale del motore coppia risulta pari a 3.5 kNm.

### Legge di controllo PTO

Sulla base dell'esperienza derivante dall'attività sperimentale e numerica precedentemente svolta, si ipotizza di utilizzare una legge di controllo dissipativa lineare con la velocità del tipo:

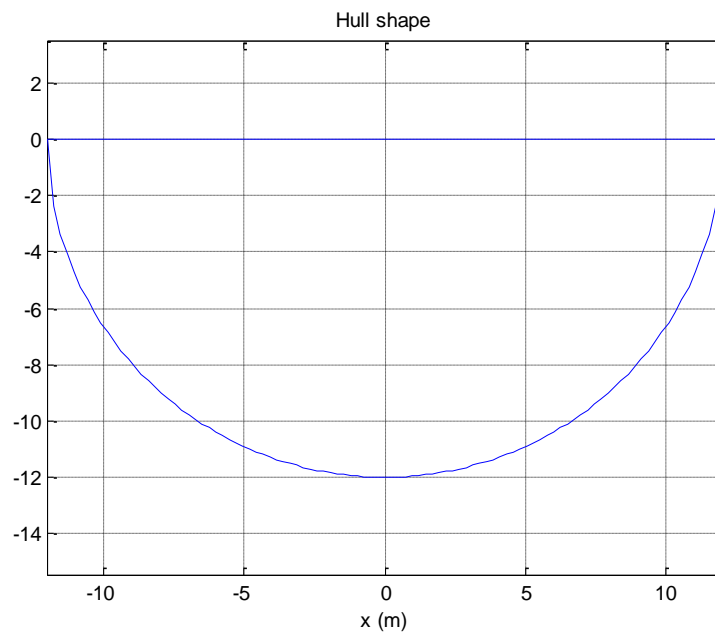
$$T_{PTO} = c\dot{\epsilon}$$

## 2.5 Analisi dello Scafo

In questo lavoro sono state considerate 3 famiglie di scafi, aventi geometrie cilindriche, sinusoidali e cilindriche alleggerite.

### 2.5.1 Scafo semicircolare

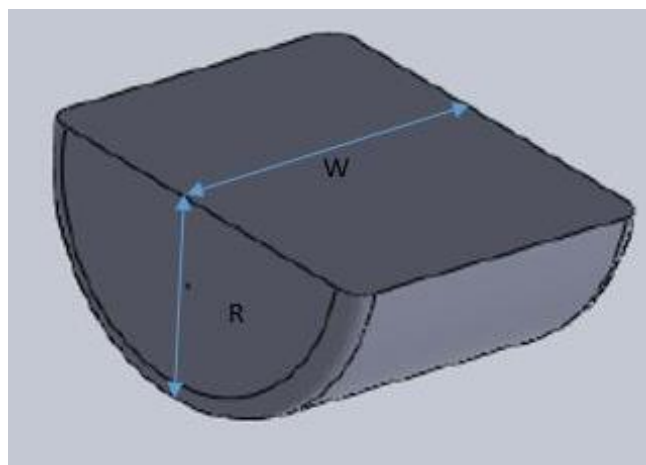
Rappresenta lo scafo utilizzato finora nelle sperimentazioni in scala.



**Figura 8: Forma dello scafo Famiglia A**

L'espressione matematica della forma dello scafo è la seguente:

$$z = -\sqrt{R^2 - x^2}$$



**Figura 9: 3D rendering.**

Di seguito sono riportate le dimensioni degli scafi analizzati. Le dimensioni sono scelte in accordo con le ipotesi progettuali.

	R (m)	W (m)	Affondamento (m)
1	18	25	7.2
2	18	20	7.2
3	18	15	7.2
4	18	10	7.2
5	12	25	4.8
6	12	20	4.8
7	12	15	4.8
8	12	10	4.8
9	8	25	3.2
10	8	20	3.2
11	8	15	3.2
12	8	10	3.2
13	18	25	10.8
14	18	20	10.8
15	18	15	10.8
16	18	10	10.8
17	12	25	7.2
18	12	20	7.2
19	12	15	7.2
20	12	10	7.2
21	8	25	4.8
22	8	20	4.8
23	8	15	4.8
24	8	10	4.8
25	18	25	7.2

**Tabella 1: Dimensioni degli scafi analizzati.**

Gli affondamenti sono imposti al 40 e al 60% dell'altezza di scafo.

Da questa prima generazione di scafi, viene eseguita un'analisi idrostatica per verificarne la stabilità statica a rollio e beccheggio.

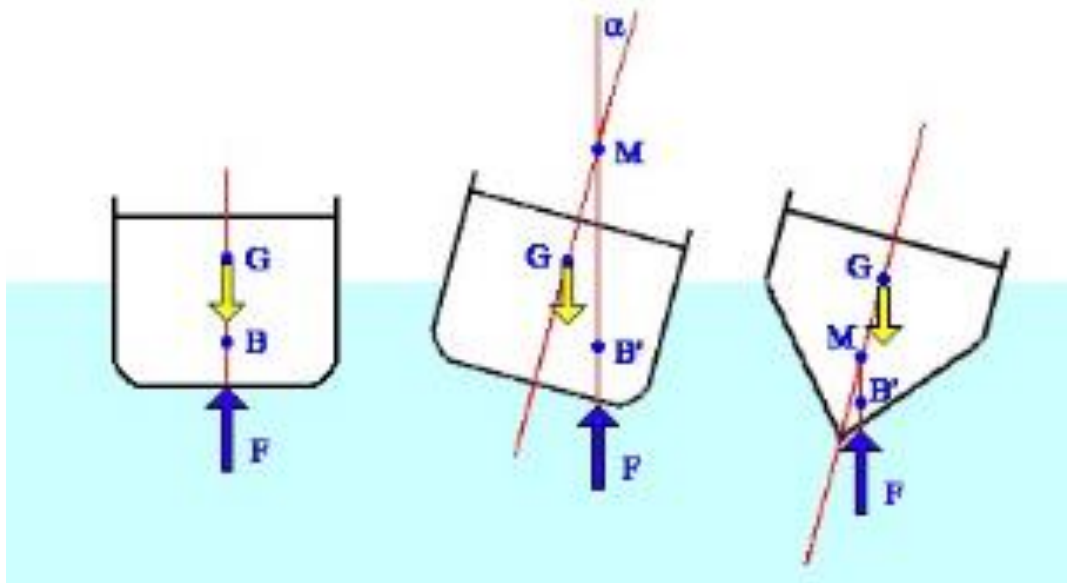


Figura 10: Diagramma di stabilità a rollio.

In funzione dell'altezza metacentrica è possibile definire il momento raddrizzante a rollio. Tale valore deve essere maggiore di zero per avere la stabilità del galleggiante. Di seguito sono mostrati i valori dei momenti stabilizzanti a rollio ( $M_x$ ) e a beccheggio ( $M_y$ ) per alcuni scafi della famiglia A. Si può notare che gli scafi A1 e A2 presentino valori positivi per entrambi i parametri, mentre gli scafi A3 e A4 siano instabili a rollio, avendo il parametro  $M_y$  negativo.

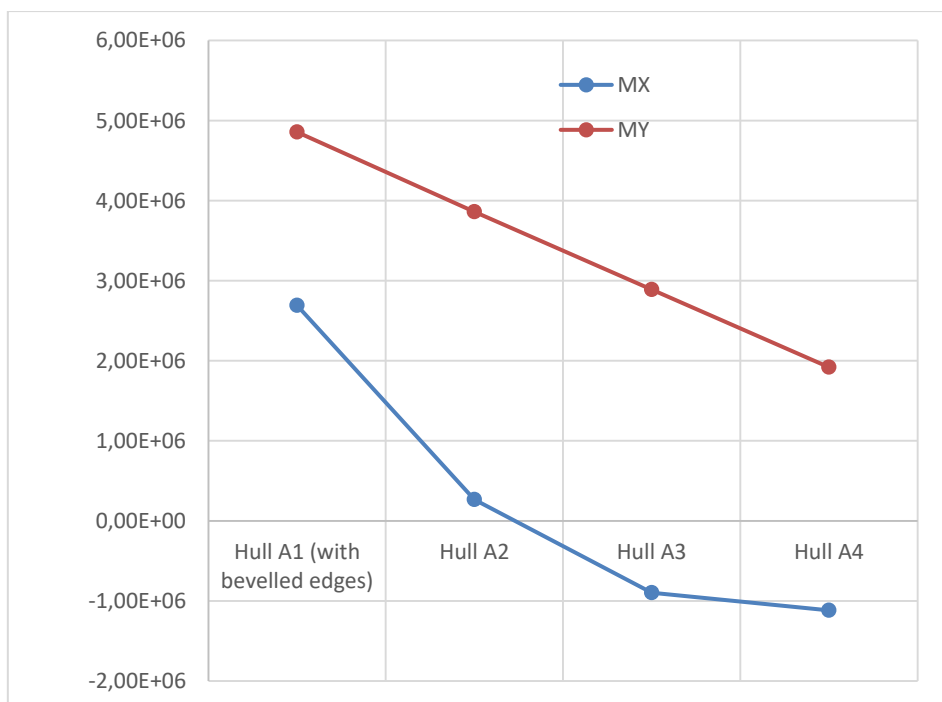


Figura 11: Diagramma di stabilità a rollio e beccheggio.

Le configurazioni che superano il test di stabilità idrostatica sono riportate nella tabella seguente.

	R (m)	W (m)	Affondamento (m)
A1 (con smusso)	18	25	7.2
A1 (senza smusso)	18	25	7.2
A2	18	20	7.2
A6	12	20	7.2
A7	12	15	7.2
A13	18	25	10.8
A14	18	20	10.8
A18	12	20	7.2
A19	12	15	7.2
A23	8	15	4.8

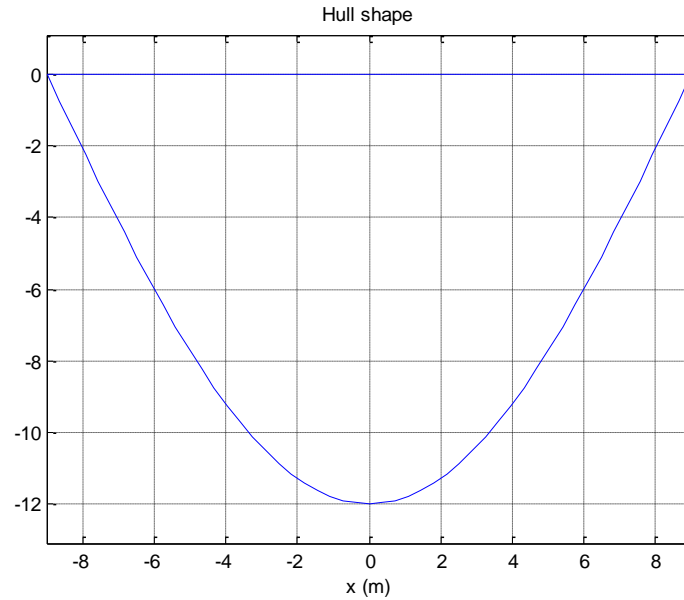
**Tabella 2: Dimensioni degli scafi stabili.**

Lo scafo A1 è analizzato nelle due versioni, senza smusso, in cui gli spigoli del cilindro non sono raccordati, e una con smusso, in cui gli spigoli del cilindro sono raccordati con raggio 1 m (come in Figura 9). Tutte le altre configurazioni presentano lo smusso, nell’ottica di ridurre gli attriti durante il movimento dello scafo in acqua e, da un punto di vista tecnologico, poter aumentare la resistenza a corrosione in corrispondenza degli spigoli.



### 2.5.2 Scafo cosinusoidale

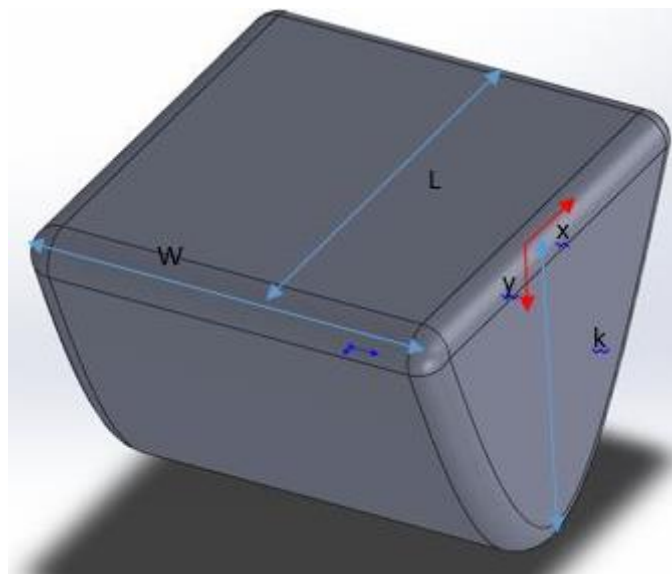
E' uno scafo leggermente più convesso di quello circolare, che disloca minor volume d'acqua a parità di affondamento, pur garantendo spazio per il posizionamento del pendolo al suo interno.



**Figura 12: Forma dello scafo Famiglia B**

L'espressione matematica è la seguente:

$$z = -k \cdot \cos\left(\frac{x}{L} \cdot \pi\right) \quad (15.17)$$



**Figura 13: 3D rendering.**

	k	L (m)	W (m)	Affondamento (m)
1	9	18	25	4.05
2	9	18	25	5.85
3	9	18	15	4.05
4	9	18	15	5.85
5	9	18	10	4.05
6	9	18	10	5.85
7	12	18	25	5.4
8	12	18	25	7.8
9	12	18	15	5.4
10	12	18	15	7.8
11	12	18	10	5.4
12	12	18	10	7.8

**Tabella 3: Dimensioni degli scafi analizzati.**

Per questa configurazione un unico scafo stabile è identificato.

	k	L (m)	W (m)	Affondamento (m)
B10	12	18	15	7.8

**Tabella 4: Dimensioni degli scafi stabili.**

### 2.5.3 Scafo circolare alleggerito

E' uno scafo semi cilindrico alleggerito a due raggi diversi. La parte centrale ospita il pendolo, mentre le parti laterali sono atte a stabilizzare lo scafo lateralmente e incrementare la trasmissione delle forze dell'onda. Inoltre la geometria è in grado di offrire un dislocamento minore a parità di ingombri di massima. Questo permette allo scafo di affondare in misura tale da offrire una superficie di scambio con l'onda sufficiente, senza dover ricorrere a un massiccio zavorramento del sistema.

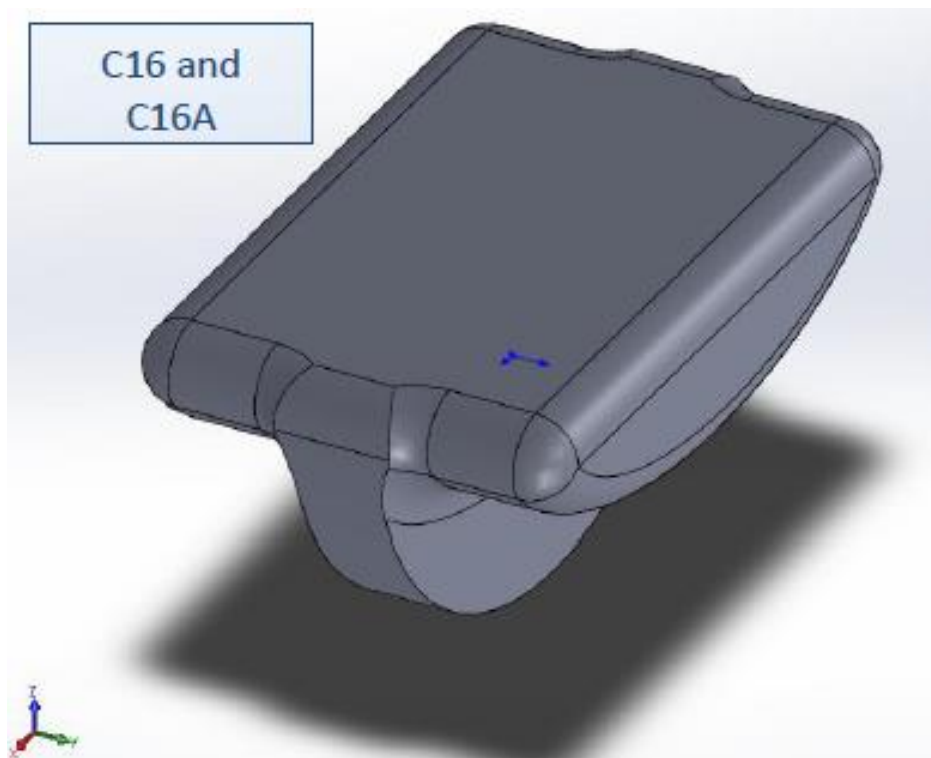


Figura 14: 3D rendering.

	R centrale		Larghezza	Larghezza	Larghezza ai	Affondamento
	(m)	R ai lati (m)	(m)	centrale (m)	lati (m)	(m)
1	18	14	20	8	6	7.2
2	18	14	20	8	6	10.8
3	18	14	10	6	2	7.2
4	18	14	10	6	2	10.8
5	12	10	20	6	7	4.8
6	12	10	20	6	7	7.2
7	12	10	10	5	2.5	4.8
8	12	10	10	5	2.5	7.2
9	12	6	10	5	2.5	7.2
10	12	6	10	2	4	7.2
11	12	6	7	2	2.5	7.2
12	8	4	10	5	2.5	4.8
13	8	4	10	2	4	4.8
13A	8	4	10	2	4	4.8
14	8	4	7	2	2.5	4.8
14A	8	4	7	2	2.5	4.8
14B	8	4	7	2	2.5	4.8
14C	8	4	7	2	2.5	4.8
14D	8	4	7	2	2.5	6.4
14E	8	4	7	2	2.5	6.4
14F	8	4	7	2	2.5	6.4
15	8	5	10	2	4	4.8
15A	8	5	10	2	4	4.8
16	8	4	10	2	4	4.8
16A	8	4	10	2	4	6.4

**Tabella 5: Dimensioni degli scafi analizzati.**

La lettera seguente il numero rappresenta una variazione della posizione del baricentro sulla stessa geometria di scafo.

	R centrale		Larghezza	Larghezza	Larghezza ai	Affondamento
	(m)	R ai lati (m)	(m)	centrale (m)	lati (m)	(m)
C1	18	14	20	8	6	7.2
C2	18	14	20	8	6	10.8
C13	8	4	10	2	4	4.8
C13A	8	4	10	2	4	4.8
C14B	8	4	7	2	2.5	4.8
C14C	8	4	7	2	2.5	4.8
C14F	8	4	7	2	2.5	6.4
C15	8	5	10	2	4	4.8
C15A	8	5	10	2	4	4.8
C16	8	4	10	2	4	4.8
C16A	8	4	10	2	4	6.4

**Tabella 6: Dimensioni degli scafi stabili.**

Per massimizzare l'estrazione di potenza è necessario che la frequenza di risonanza dello scafo sia molto simile a quella dell'onda incidente – a riferimento è considerata l'onda di progetto pari a 6.7 s. In generale tali scafi, se considerati a massa omogenea, non rispondono al requisito, come mostrato in Figura 15 tramite il valore del RAO (Response Amplitude Operator) lungo il grado di libertà di beccheggio.

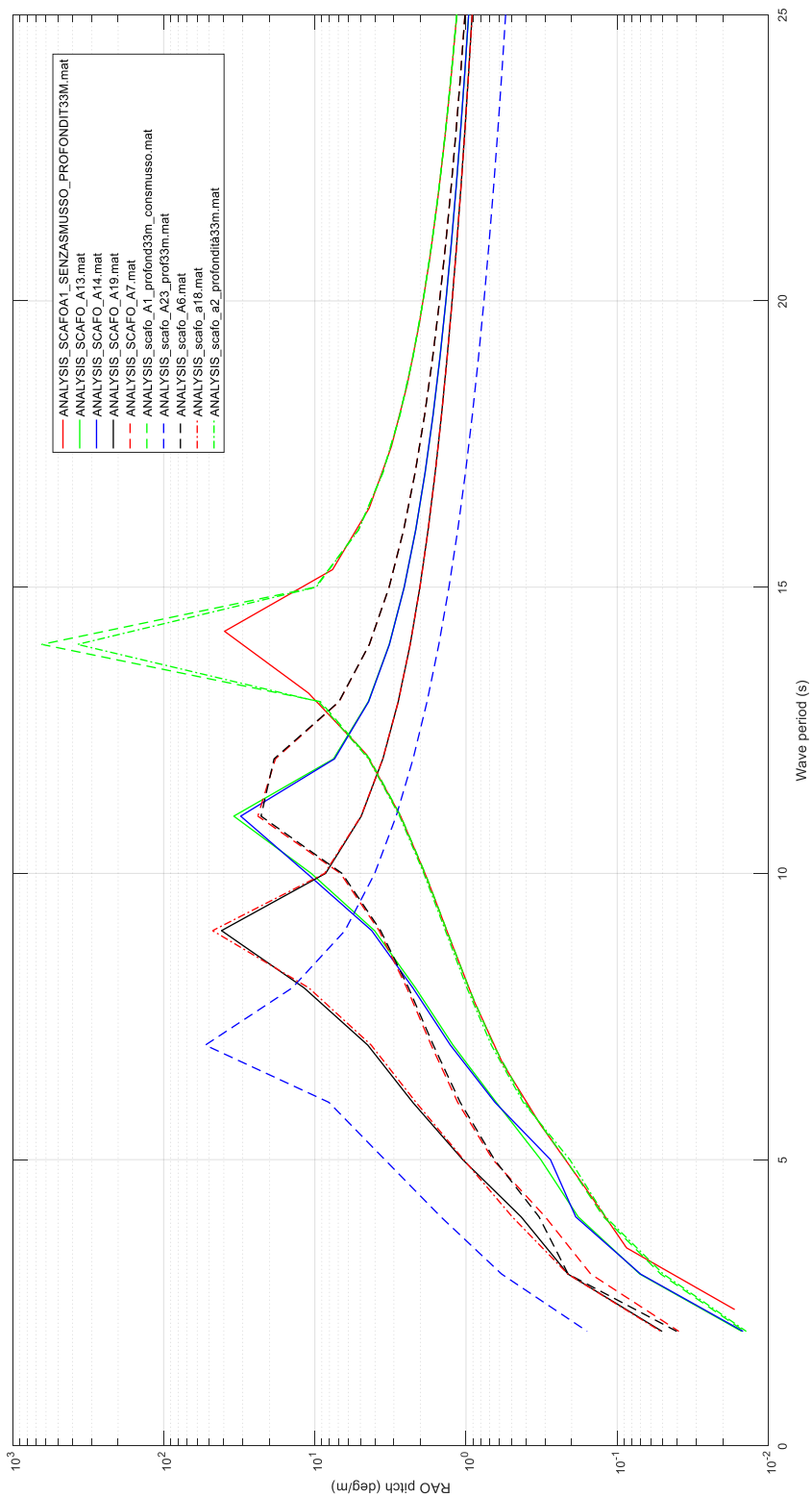
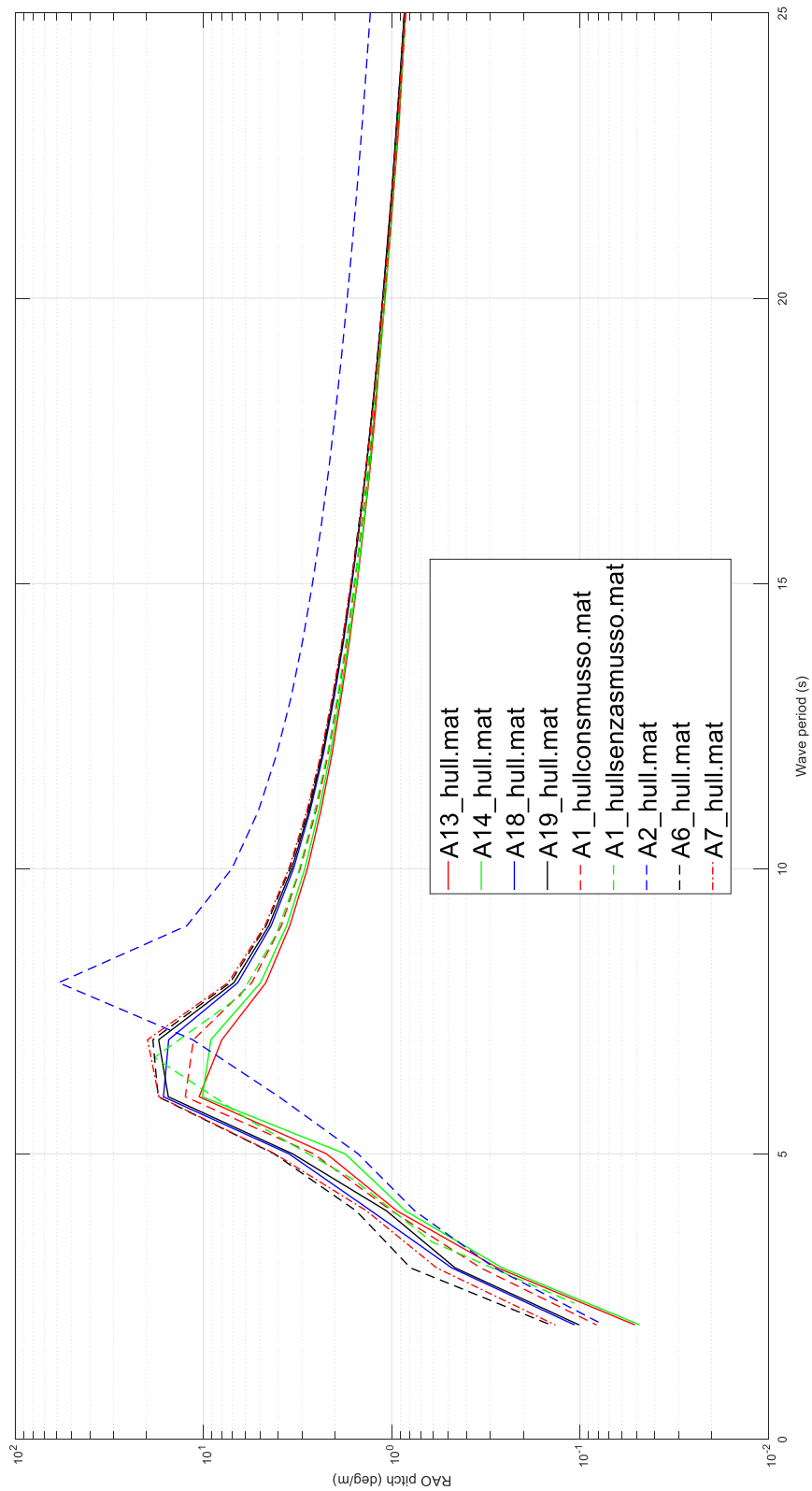


Figura 15: RAO famiglia A, beccheggio, scafi a massa omogenea.

Gli scafi precedentemente identificati devono quindi essere adattati a essere risonanti nell'intorno di 6.7 s variando la loro inerzia e la posizione del baricentro entro i limiti consentiti dalla geometria. Un tool per la

stima di tali parametri è stato sviluppato e applicato a ogni singolo scafo. La Figura 16 mostra gli scafi della famiglia A dopo essere stati adattati.



**Figura 16: RAO famiglia A, beccheggio, scafi con inerzia adattata.**

In Tabella 7 sono mostrati i valori di inerzia e di posizione del baricentro valutato rispetto al piano di galleggiamento per gli scafi ottimizzati.

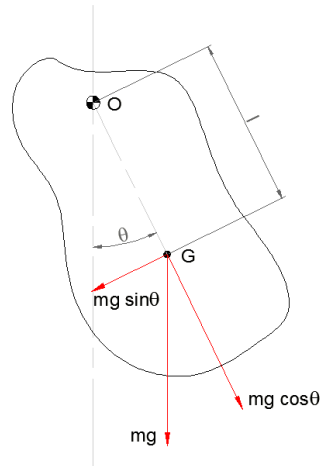
	Tresonance_pitchRAO (s)	Mx (Nm/deg)	My (Nm/deg)	Ix (Nm*s^2)	Iy (Nm*s^2)	M (kg)	COGz (m)
A1consmusso	6.0	2.69E+06	4.83E+06	9.46E+08	2.28E+08	3.71E+06	3.168
A1senzasmusso	6.7	2.68E+06	4.83E+06	9.51E+08	2.29E+08	3.71E+06	3.161
A2	7.0	2.61E+05	3.88E+06	5.66E+08	1.88E+08	2.95E+06	3.169
A6	7.0	1.33E+06	1.15E+06	1.95E+08	5.96E+07	1.31E+06	2.116
A7	7.0	2.60E+05	8.65E+05	9.66E+07	4.57E+07	9.78E+05	2.118
A13	6.0	2.93E+06	8.53E+06	9.46E+08	3.76E+08	6.55E+06	-0.433
A14	6.0	1.77E+05	6.82E+06	5.66E+08	3.15E+08	5.24E+06	-0.432
A18	6.0	1.48E+06	2.02E+06	1.95E+08	1.00E+08	2.32E+06	-0.285
A19	7.0	2.69E+05	1.52E+06	9.66E+07	7.81E+07	1.74E+06	-0.282
A23	7.0	4.47E+05	4.79E+05	3.44E+07	3.05E+07	7.69E+05	-0.184
B10	7.0	2.13E+05	1.16E+05	3.01E+07	5.38E+06	1.07E+06	-0.553
C1	8.0	3.31E+05	1.94E+06	7.65E+07	1.39E+08	1.65E+06	3.961
C2	8.0	3.80E+05	4.11E+06	1.62E+08	2.96E+08	3.51E+06	0.361
C13	5.0	1.90E+04	5.17E+04	9.79E+05	1.47E+06	1.18E+05	0.644
C13A	5.0	1.41E+04	5.53E+04	9.79E+05	1.47E+06	1.18E+05	0.644
C14B	3.7	8.94E+03	7.92E+04	6.32E+05	1.55E+06	1.10E+05	-1.000
C14C	3.7	2.78E+04	9.81E+04	6.32E+05	1.55E+06	1.10E+05	-2.000
C14F	4.0	3.26E+04	1.29E+05	1.20E+06	2.95E+06	2.10E+05	-2.000
C15	5.0	5.01E+04	7.90E+04	1.60E+06	2.17E+06	1.76E+05	0.572
C15A	5.0	4.70E+04	8.43E+04	1.69E+06	2.36E+06	1.84E+05	0.518
C16	4.0	6.83E+04	1.38E+05	1.39E+06	2.68E+06	1.48E+05	0.875
C16A	4.0	1.48E+05	4.18E+05	3.39E+06	6.56E+06	3.63E+05	-0.725

Tabella 7: Valori inerziali e geometrici degli scafi.



## 2.6 Analisi del pendolo

In Figura 17 è rappresentato un esempio generico di pendolo fisico, composto da una massa uniformemente distribuita e incernierata in  $O$ . Il baricentro della massa è individuato dal punto  $G$ , il quale dista  $l$  dal punto  $O$ . La distanza  $l$  è misurata sulla congiungente dei punti  $O$  e  $G$ .



**Figura 17 - Pendolo fisico**

L'equazione di equilibrio alla rotazione del pendolo rappresentato in Figura 17, nell'ipotesi di trascurare gli attriti nella cerniera e di assumere angoli di oscillazione sufficientemente piccoli, risulta essere:

$$I_0 \ddot{\vartheta} + m_p g l \vartheta = 0$$

Dove:

- $I_0$  ( $kgm^2$ ): è il momento di inerzia della massa oscillante rispetto alla cerniera;
- $m_p$  ( $kg$ ): massa del pendolo;
- $l$  ( $m$ ): distanza tra la cerniera del pendolo e il suo baricentro.

Osservando la precedente equazione, si può osservare come la rigidezza del sistema sia rappresentata dal termine gravitazionale  $m_p g l$ .

Tale equazione può essere riscritta anche nel seguente modo:

$$\ddot{\vartheta} + \frac{m_p g d}{I_0} \vartheta = 0$$

Pertanto il periodo di risonanza del pendolo fisico è esprimibile come:

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{I_0}{m_p g l}}$$

Volendo introdurre anche l'effetto del controllo  $c - k$ , l'equazione dinamica del pendolo si modifica nel seguente modo:

$$\ddot{\vartheta} + c \dot{\vartheta} + \left( k + \frac{m_p g d}{I_0} \right) \vartheta = 0$$

Di primaria importanza per la scelta del pendolo corretto è l'identificazione del suo periodo di risonanza. Di seguito si mostra l'analisi parametrica eseguita su geometria a pendolo circolare, per l'identificazione del periodo di risonanza  $T_n$  e dell'ingombro  $i$ , a partire dal raggio del pendolo circolare  $r$  e la distanza del centro del pendolo e la cerniera  $l$ .

$$T_n = \frac{2\pi}{\sqrt{g}} \sqrt{\frac{r^2}{2l} + l}$$

$$i = l + r$$

r/l	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	9	10
0.3	0.8	1.3	1.8	2.3	2.8	3.3	3.8	4.3	4.8	5.3	5.8	6.3	6.8	7.3	7.8	8.3	9.3	10
0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9.5	11
0.8	1.3	1.8	2.3	2.8	3.3	3.8	4.3	4.8	5.3	5.8	6.3	6.8	7.3	7.8	8.3	8.8	9.8	11
1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	10	11
1.3	1.8	2.3	2.8	3.3	3.8	4.3	4.8	5.3	5.8	6.3	6.8	7.3	7.8	8.3	8.8	9.3	10	11
1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	11	12
2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	11	12
2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	11	12	13
3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	11	11	12	13
3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	11	11	12	13	14
4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	11	11	12	12	13	14
4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	11	11	12	12	13	14	15

Tabella 8: Ingombro  $i$  (m).

r/l	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	9	10
0.3	1.5	2.0	2.5	2.8	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.5	4.7	4.9	5.1	5.3	5.5	5.7	6.0	6.3
0.5	1.7	2.1	2.5	2.9	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.5	4.7	4.9	5.1	5.3	5.5	5.7	6.0	6.3
0.8	2.1	2.3	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.5	4.7	4.9	5.1	5.3	5.5	5.7	6.0	6.4
1	2.5	2.5	2.7	3.0	3.3	3.6	3.8	4.1	4.3	4.5	4.7	4.9	5.1	5.3	5.5	5.7	6.0	6.4
1.3	2.9	2.7	2.9	3.1	3.4	3.6	3.9	4.1	4.3	4.6	4.8	5.0	5.2	5.3	5.5	5.7	6.0	6.4
1.5	3.3	2.9	3.0	3.2	3.4	3.7	3.9	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4	5.5	5.7	6.1	6.4
2	4.3	3.5	3.4	3.5	3.6	3.8	4.0	4.3	4.5	4.7	4.9	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.1	6.4
2.5	5.2	4.1	3.8	3.8	3.9	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8	4.9	5.1	5.3	5.5	5.6	5.8	6.1	6.4
3	6.2	4.7	4.3	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.7	4.9	5.0	5.2	5.4	5.5	5.7	5.9	6.2	6.5
3.5	7.2	5.4	4.7	4.5	4.5	4.5	4.6	4.7	4.9	5.0	5.2	5.3	5.5	5.6	5.8	5.9	6.2	6.5
4	8.1	6.0	5.2	4.9	4.8	4.8	4.8	4.9	5.0	5.2	5.3	5.4	5.6	5.7	5.9	6.0	6.3	6.6
4.5	9.1	6.7	5.8	5.3	5.1	5.1	5.1	5.1	5.2	5.3	5.4	5.6	5.7	5.8	6.0	6.1	6.4	6.7
5	10.1	7.4	6.3	5.8	5.5	5.4	5.3	5.4	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6.1	6.2	6.5	6.7

Tabella 9: Periodo di risonanza  $T_n$  (s).

## 2.7 Ormeggio

L'ormeggio individuato è mostrato in Figura 18. E' composto da un Jumper (schematizzato dal rettangolo) e da una massa (rappresentata dal triangolo), connesse a un corpo morto sul fondale marino da un lato e allo scafo dall'altro. Tale ormeggio permette di ottenere una caratteristica di richiamo non lineare, particolarmente adatta ai convertitori di energia da moto ondoso.

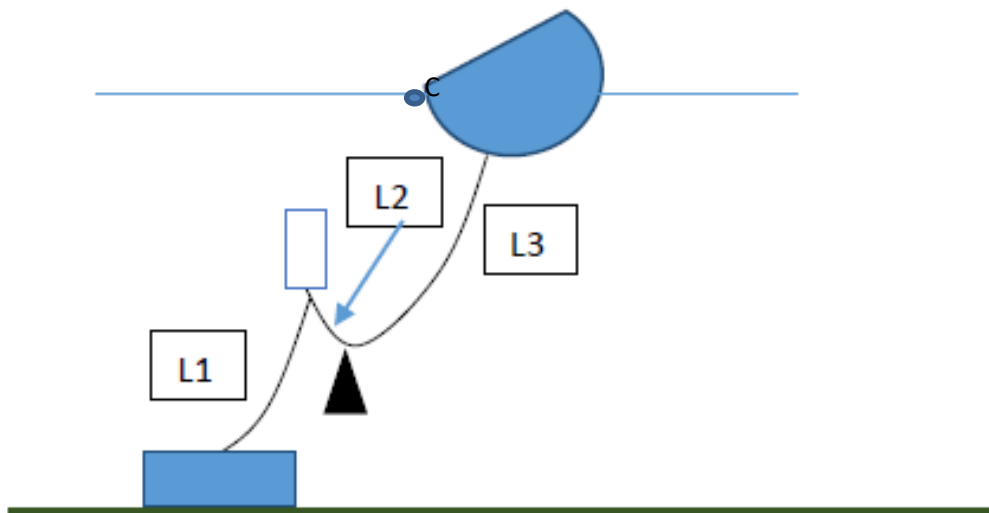


Figura 18: Layout dell'ormeggio.

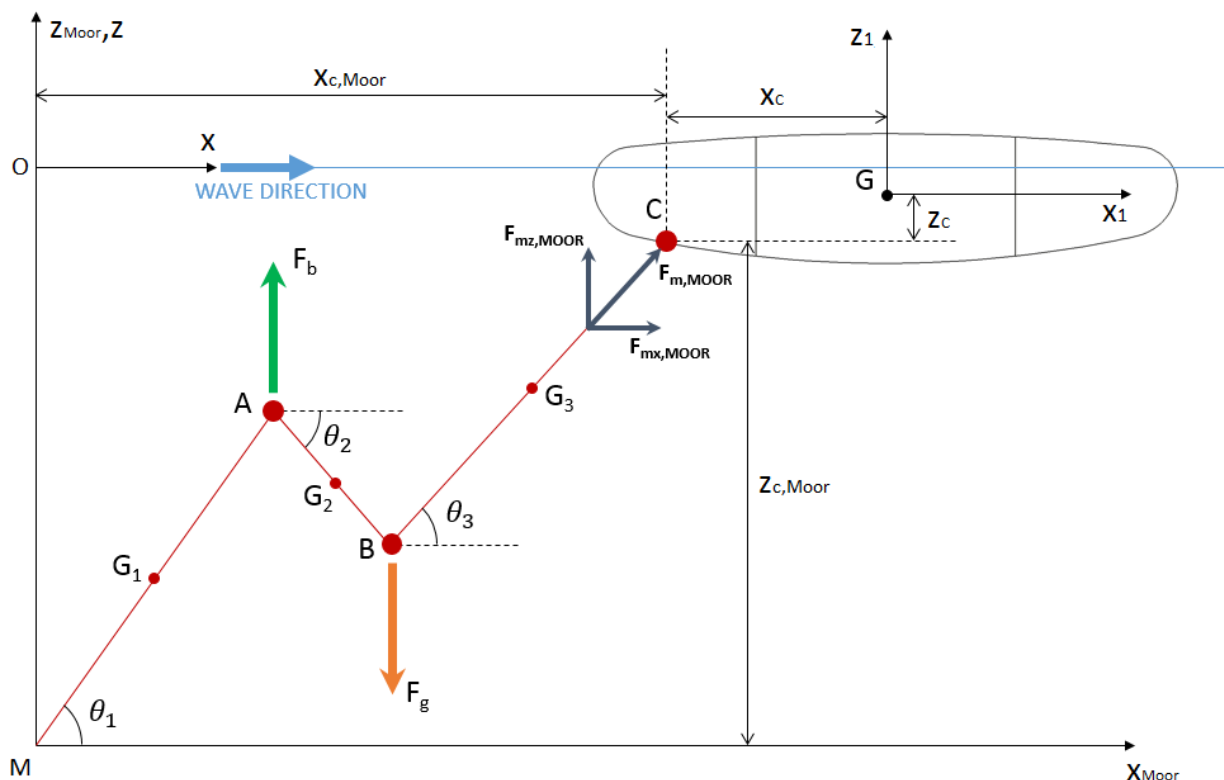


Figura 19: Schema dell'ormeggio.

Il sistema di ormeggio è modellato attraverso un comportamento quasi-statico. Il sistema è composto principalmente da tre diverse linee (catene o linee) considerati come corpi rigidi con COG nei punti G1, G2, G3. Il primo punto di connessione A rappresenta la boa a spinta positiva (jumper) avente forza di spinta  $F_b$ . Il secondo punto di connessione B rappresenta un corpo morto con forza netta di gravità  $F_a$ . Il punto di connessione con il dispositivo è il punto C.

L'equilibrio statico del sistema è studiato variando le coordinate  $x_c$  e  $z_c$  del punto di connessione, nel sistema di riferimento dell'ormeggio. Queste variazioni rappresentano tutte le diverse possibili posizioni del dispositivo compatibilmente con l'estensione massima della linea di ormeggio.

Per tutti i diversi valori di  $x_{C,Moor}$  e  $z_{C,Moor}$ , l'energia potenziale è calcolata in funzione dell'angolo  $\vartheta_1$ . La condizione di equilibrio è determinato quando l'energia potenziale raggiunge il suo valore minimo. La tensione della linea di ormeggio  $F_{m,Moor}$  nel punto di collegamento C può essere calcolata, rispetto al sistema di riferimento ormeggio. La tensione è decomposta lungo le coordinate  $x_{Moor}$  e  $z_{Moor}$ .

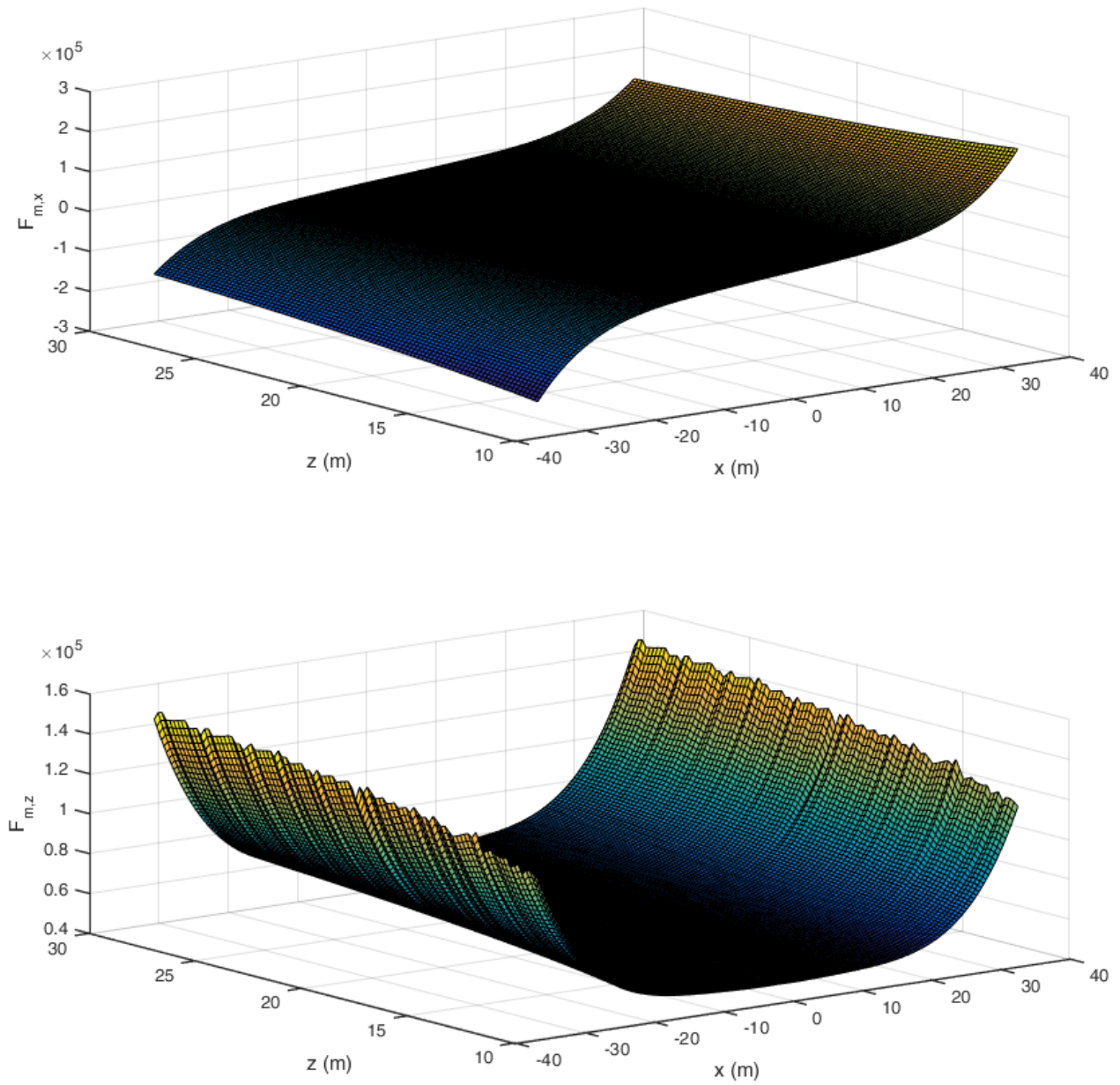


Figura 20: Risultati della modellazione dell'ormeggio.

## 2.8 Modellazione lineare

A partire dalle ipotesi di progetto, e dalle configurazioni di convertitore (scafo + pendolo) è possibile effettuare l'analisi lineare del convertitore. L'analisi lineare permette di identificare in maniera approssimata, ma rapida, le caratteristiche di una specifica configurazione e di valutarne l'influenza dei parametri significativi. L'analisi è effettuata per onda regolare monocromatica, ad ampiezza costante.

Per ognuno degli scafi oggetto dell'analisi è possibile identificare un pendolo che abbia periodo di risonanza pari a quello dell'onda di progetto, in modo da massimizzare la produttività del sistema. La scelta del pendolo è funzione del suo ingombro e dello spazio disponibile all'interno del galleggiante. Nella seguente Tabella 10 sono mostrati i pendoli maggiormente risonanti al periodo di progetto di 6.7 s e compatibili con gli ingombri interni.

	imax (m)	i (m)	R (m)	L (m)	Tn (s)
A1 (con smusso)	9	5.5	4.5	1	6.69
A1 (senza smusso)	9	5.5	4.5	1	6.69
A2	9	5.5	4.5	1	6.69
A6	6	5.5	4.5	1	6.69
A7	6	3	2.5	0.5	5.21
A13	9	5.5	4.5	1	6.69
A14	9	5.5	4.5	1	6.69
A18	6	5.5	4.5	1	6.69
A19	6	5.5	4.5	1	6.69
A23_1	4	3.5	3	0.5	6.18
A23_2	4	3	2.5	0.5	5.21
B10	5.445	4	3.5	0.5	7.16
C1	9	5.5	4.5	1	6.69
C2	9	5.5	4.5	1	6.69
C13_1	4	3	2.5	0.5	5.21
C13_2	4	3.5	3	0.5	6.18
C13A	4	3.5	3	0.5	6.18
C14B	4	3.5	3	0.5	6.18
C14C	4	3.5	3	0.5	6.18
C14F	4	3.5	3	0.5	6.18
C15	4	3.5	3	0.5	6.18
C15A_1	4	3	2.5	0.5	5.21
C15A_2	4	3.5	3	0.5	6.18
C16_1	4	3	2.5	0.5	5.21
C16_2	4	3.5	3	0.5	6.18
C16A_1	4	3	2.5	0.5	5.21
C16A_2	4	3.5	3	0.5	6.18

**Tabella 10: Accoppiamenti scafo-pendolo.**

In funzione dello scafo e del pendolo associato è possibile valutare la posizione della cerniera al suo interno, identificando i tre valori massimi, medi e minimi del parametro  $d$ , indicante la distanza fra il baricentro del sistema e la cerniera del pendolo. Tali valori costituiranno i valori di prima esplorazione delle simulazioni.



	dmin	dmed	dmax
A1 (con smusso)	-4.9	1.4	7.6
A1 (senza smusso)	-4.9	1.4	7.6
A2	-4.9	1.4	7.6
A6	-3.8	-0.6	2.7
A7	-3.8	-0.6	2.7
A13	-4.9	1.4	7.6
A14	-4.9	1.4	7.6
A18	-1.4	1.8	5.1
A19	-1.4	1.8	5.1
A23_1	-1.6	0.9	3.4
A23_2	-1.1	1.1	3.4
B10	-2.9	0.9	4.8
C1	-5.7	0.6	6.8
C2	-5.7	0.6	6.8
C13_1	-2.4	0.1	2.6
C13_2	-1.9	0.3	2.6
C13A	-1.9	0.4	2.6
C14B	-0.3	2.0	4.2
C14C	0.7	3.0	5.2
C14F	-0.9	1.4	3.6
C15	-1.9	0.4	2.6
C15A_1	-2.3	0.2	2.7
C15A_2	-1.8	0.4	2.7
C16_1	-2.7	-0.2	2.3
C16_2	-2.2	0.1	2.3
C16A_1	-2.7	-0.2	2.3
C16A_2	-2.2	0.1	2.3

**Tabella 11: Intervallo del parametro d.**

Per ogni configurazione di convertitore, per ogni valore di  $d$ , vengono ipotizzate 5 masse diverse di pendolo. Le masse sono scelte in funzione della massa totale del convertitore fra il 10% e il 60% della massa totale. Per ogni configurazione è variato il parametro di smorzamento  $c$  della legge di controllo per poter identificare la legge più adatta per ogni configurazione.

Un esempio di analisi lineare è mostrata in Figura 21, Figura 22, Figura 23, Figura 24, Figura 25.

**mp = 11.01 ton**

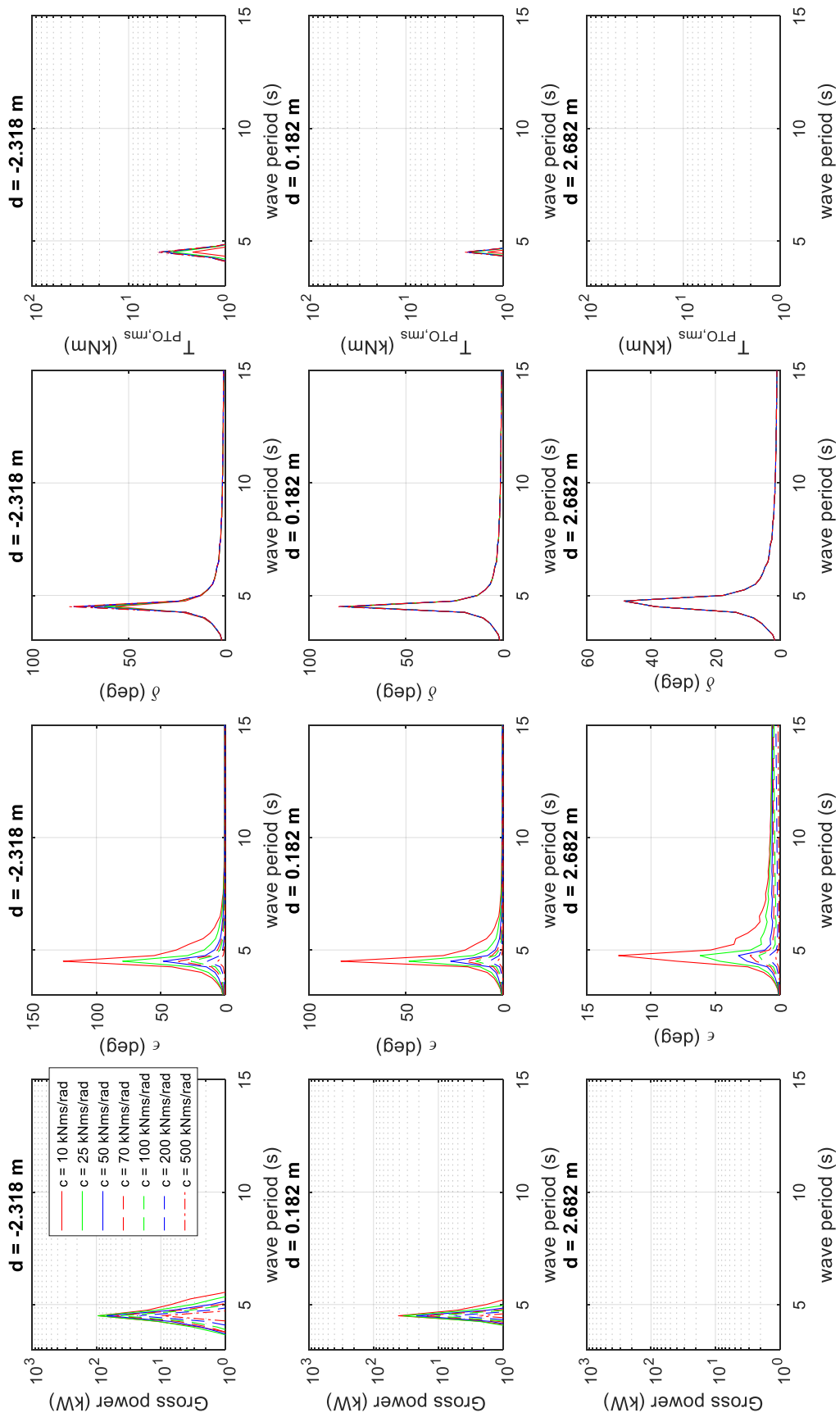


Figura 21: Scafo C15A, massa pendolo 11 ton.

**mp = 19.5789 ton**

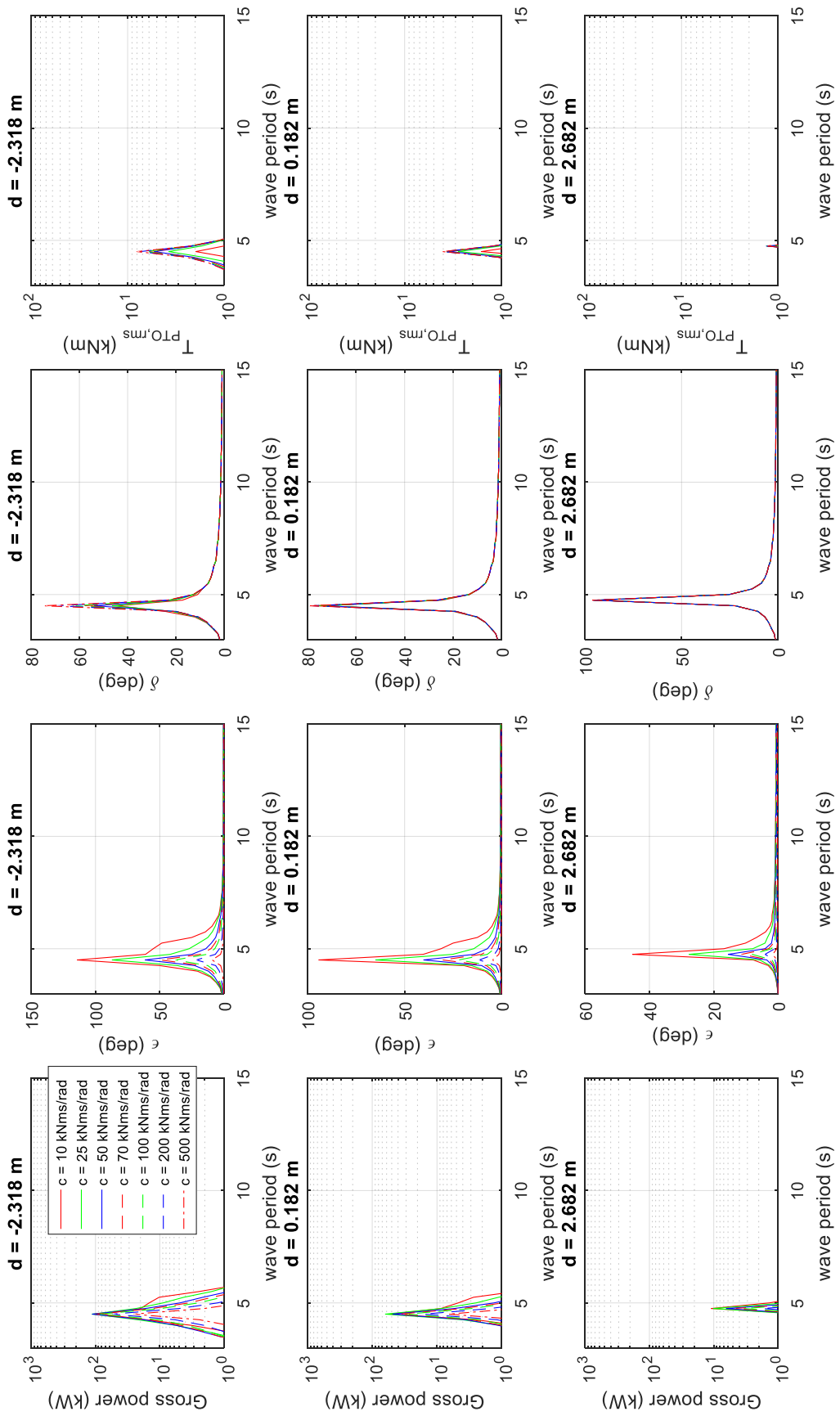
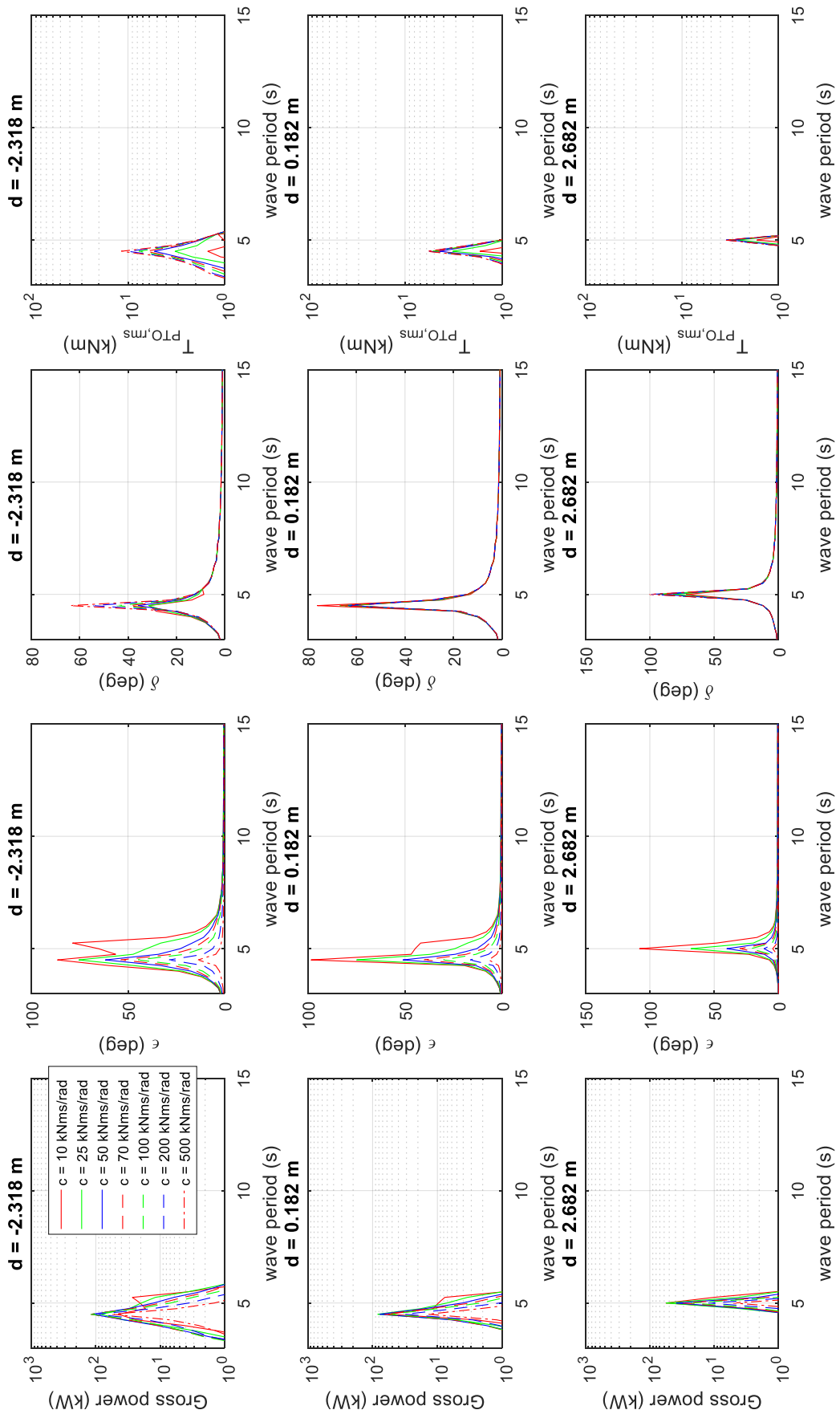


Figura 22: Scafo C15A, massa pendolo 20 ton.

**mp = 34.8167 ton**



**Figura 23: Scafo C15A, massa pendolo 35 ton.**

**mp = 61.9138 ton**

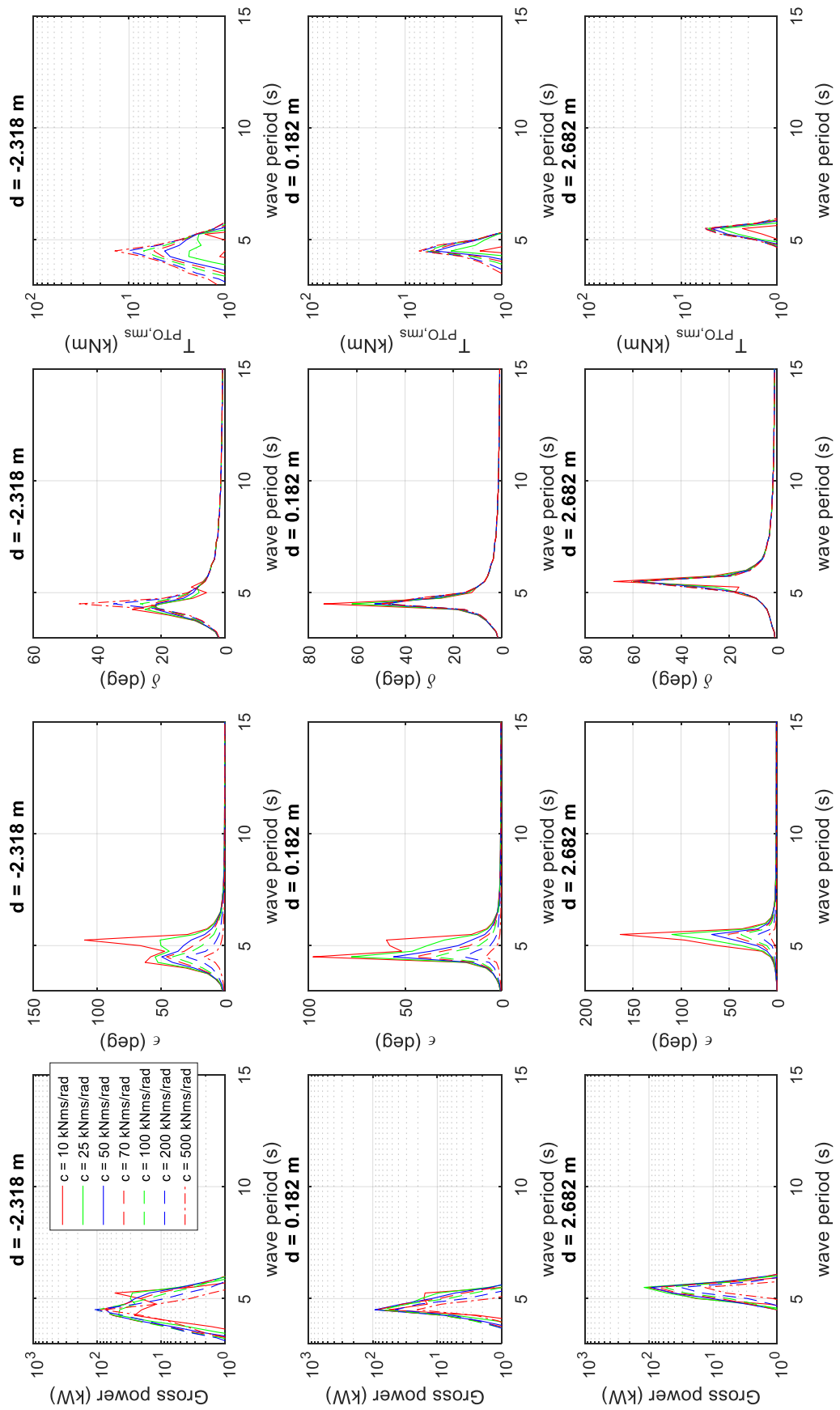
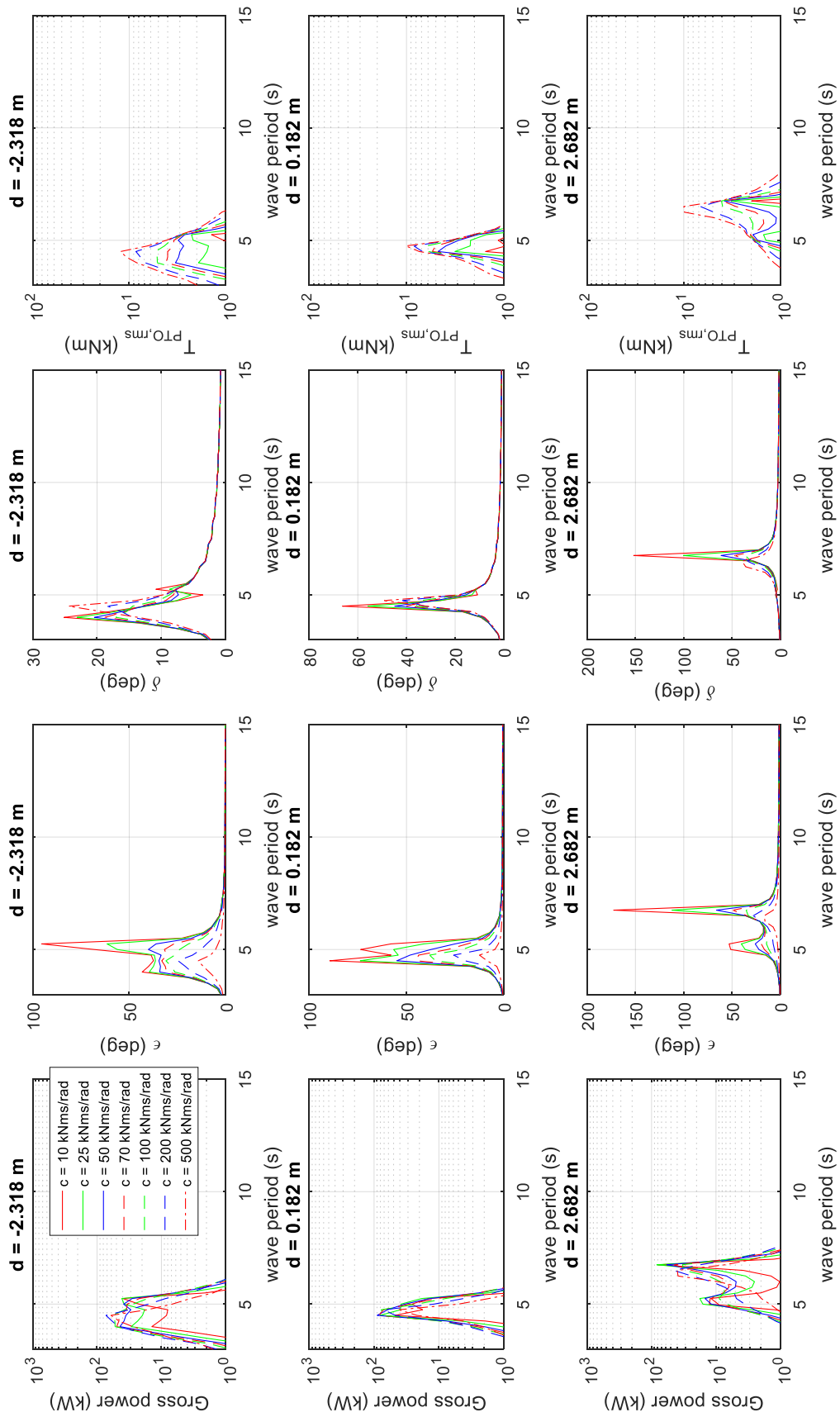


Figura 24: Scafo C15A, massa pendolo 62 ton.

**mp = 110.1 ton**



**Figura 25: Scafo C15A, massa pendolo 110 ton.**

I risultati dell'analisi lineare forniscono le grandezze di funzionamento del sistema per le diverse configurazioni. Sono riportate le quattro grandezze maggiormente rilevanti nel funzionamento del sistema: l'angolo di beccheggio dello scafo  $\delta$ , l'angolo di oscillazione del pendolo  $\varepsilon$ , la coppia efficace agente sul PTO e la potenza media prodotta.

Si può notare che gran parte delle configurazioni massa pendolo  $m_p$  / posizione della cerniera  $d$  è possibile ottenere la potenza di progetto con le coppie al PTO minori di quella nominale ipotizzata, garantendo, di fatto, la fattibilità del sistema.

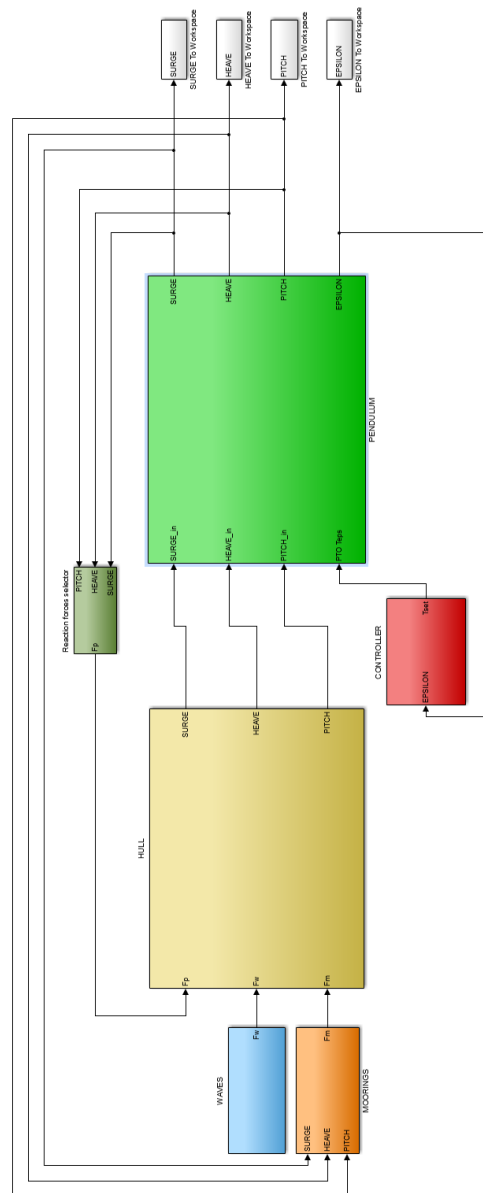
Si può notare che gran parte delle simulazioni identificano il picco di potenza prodotta a periodi leggermente inferiori a quello di progetto pari a 6.7 s. La situazione è più favorevole per il sistema avente massa del pendolo maggiore, per il quale si verifica un picco di potenza a forma di plateau, quindi più largo e adatto ad assorbire potenza per diversi periodi di onda, come si nota particolarmente per la configurazione a  $d$  massima.

In appendice sono mostrate le analisi lineari per ogni configurazione di scafo, con indicazione della potenza prodotta.



## 2.9 Modellazione non-lineare

Per una stima maggiormente precisa delle prestazioni è necessario procedere con analisi in onda irregolare e con un modello in time-domain che includa i limiti fisici del sistema, il più importante la coppia massima esercitata dal PTO, funzione della sua taglia.



**Figura 26: Modello Time Domain implementato in ambiente Matlab/Simulink.**

Inoltre la simulazione va ripetuta per ognuna delle celle presenti nella tabella delle ricorrenze di Figura 7, in modo da poter stimare la produttività annuale di ogni convertitore. Tale valore di produttività è utilizzato per valutare le prestazioni delle diverse configurazioni investigate. In Figura 27, Figura 28 e Figura 29 è mostrata l'analisi non lineare per lo scafo C15A: ogni figura mostra la power matrix del convertitore, mentre nel titolo è indicata la produttività, ottenuta moltiplicando la power matrix per la tabella delle occorrenze.

**d = -2.32 m**

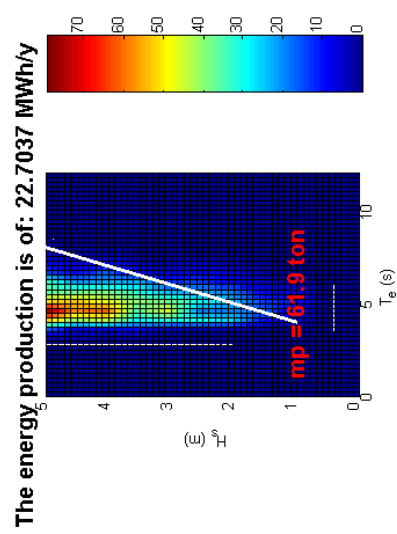
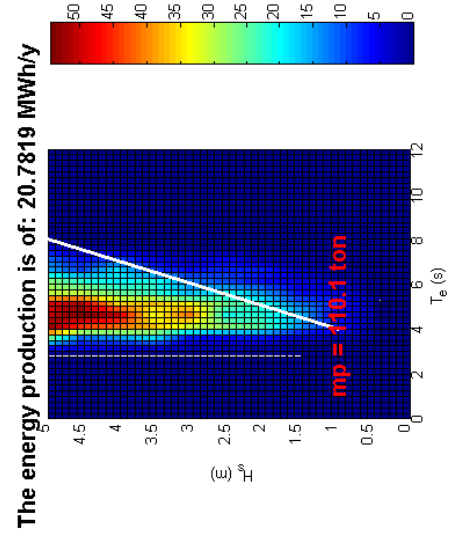
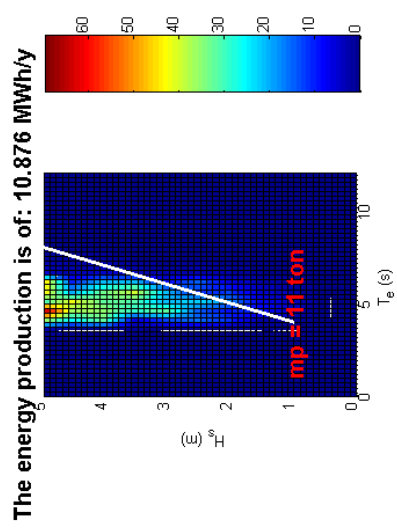
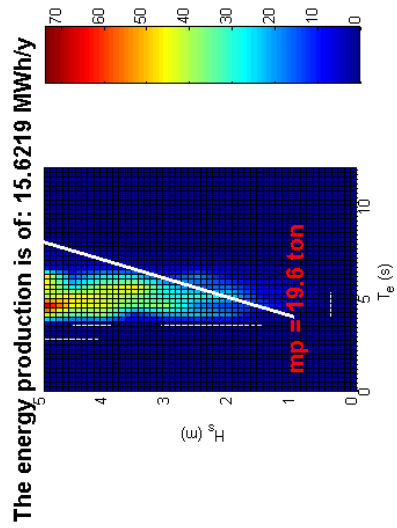
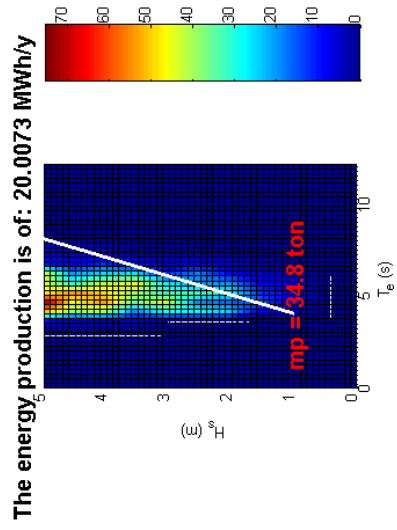


Figura 27: Scafo C15A, d = -2.32 m.

**d = 0.18 m**

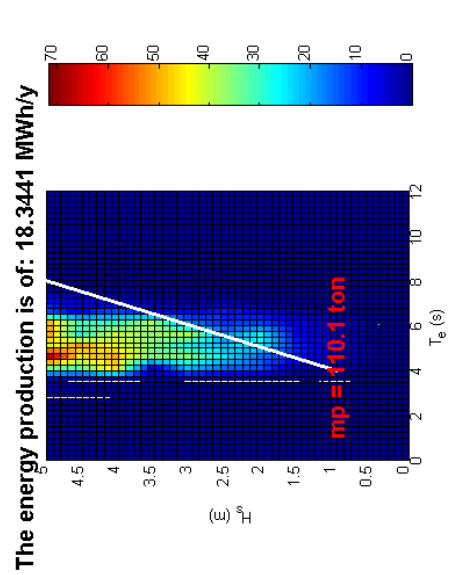
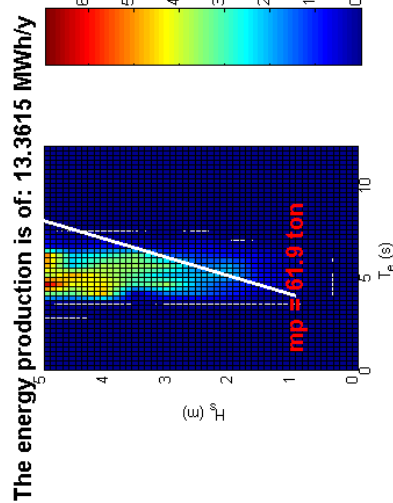
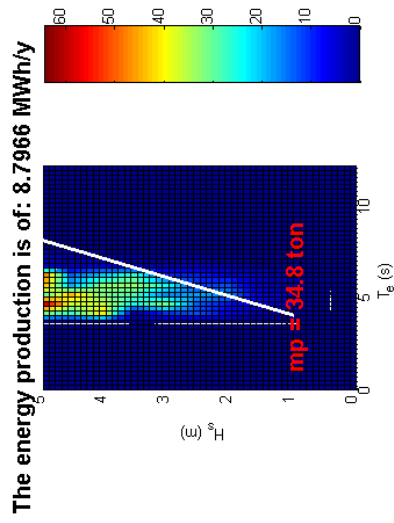
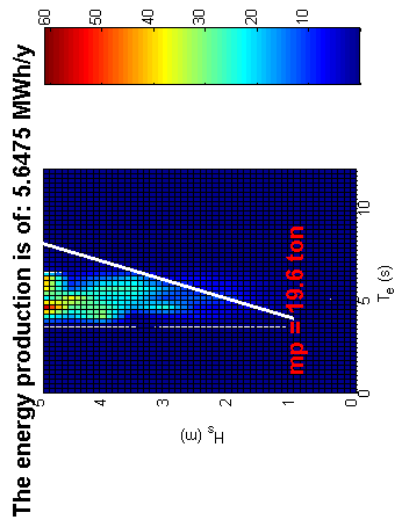
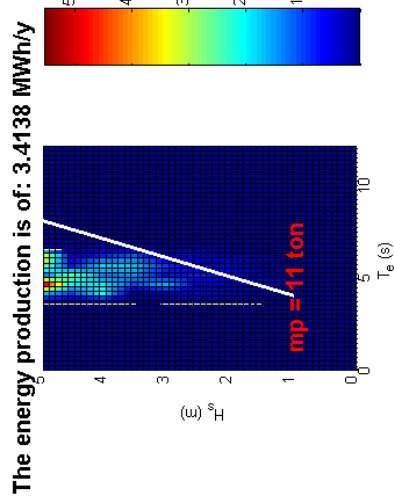


Figura 28: Scafo C15A, d = 0.18 m.

**d = 2.68 m**

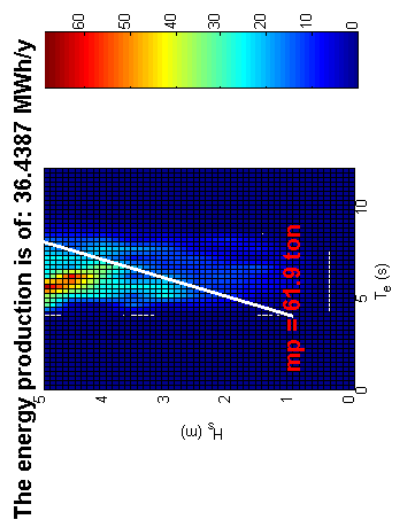
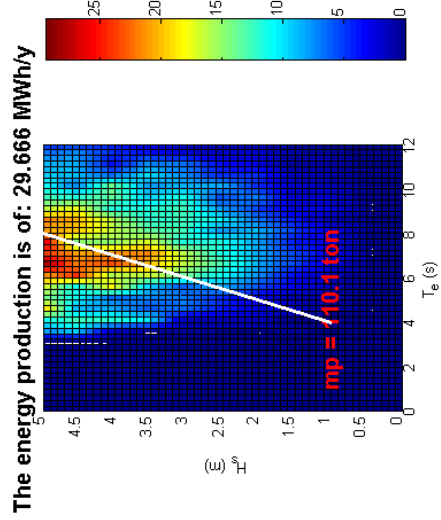
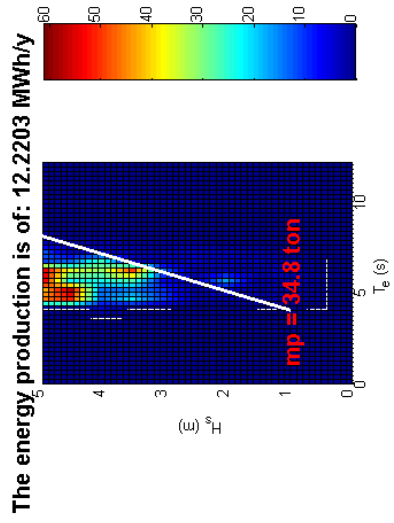
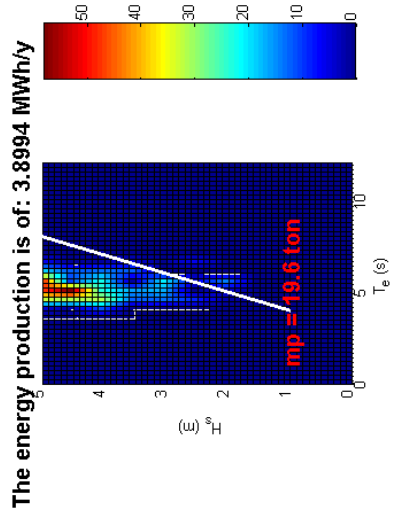
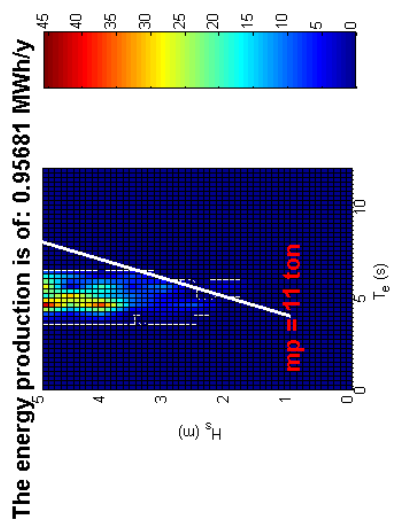


Figura 29: Scafo C15A, d = 2.68 m.

Dall'analisi si evince che il modello non-lineare agisce in accordo con le valutazioni preliminari effettuate con il modello lineare. Infatti, si può notare che la configurazione con massa del pendolo e posizione della cerniera ai loro valori massimi garantisce una power matrix molto più ampia e favorevole ad assorbire energia da un maggiore spettro di onde. Si nota tuttavia che la massima produttività si ha per una massa del pendolo inferiore a quella delineata. Questo induce a osservare che si può ottenere una combinazione opportuna di massa del pendolo, posizione della cerniera e parametri di controllo che possano soddisfare l'ottimizzazione della produttività e un ampio range di lavoro rispetto alle condizioni ondose.

### 2.10 Sintesi dell'attività di modellazione

In Tabella 12 è mostrata la produttività per le configurazioni di maggiore rilievo derivante dall'analisi. Il pedice aggiuntivo finale indica variazioni di posizione del baricentro nell'intorno della configurazione scelta, atte a migliorarne la produttività.

	mp1	mp2	mp3	mp4	mp5		mp1	mp2	mp3	mp4	mp5
<b>A23_1</b>						<b>C16_1</b>					
dmin	10.9	14.1	15.6	15.2	14.5	dmin	4.3	6.9	10.4	13.7	14.7
dmed	26.9	29.2	29.7	31.5	31.0	dmed	1.6	2.8	4.4	6.6	8.9
dmax	31.4	26.4	21.3	15.8	15.7	dmax	0.1	0.1	0.1	0.3	5.2
<b>A23_2</b>						<b>C16_2</b>					
dmin	5.8	5.0	8.1	15.2	19.7	dmin	3.7	6.0	9.0	12.0	13.5
dmed	21.1	26.5	29.5	30.2	31.4	dmed	2.1	3.5	5.7	8.9	12.3
dmax	32.1	27.3	22.1	17.5	17.7	dmax	0.8	1.5	3.0	6.2	12.8
<b>C13_1</b>						<b>C16A_1</b>					
dmin	4.5	6.5	8.6	10.0	9.5	dmin	4.4	7.0	10.5	13.9	14.9
dmed	1.2	2.0	3.1	4.7	6.5	dmed	1.7	2.8	4.4	6.6	8.9
dmax	0.5	1.7	7.5	20.4	17.5	dmax	0.1	0.1	0.1	0.3	5.1
<b>C13_2</b>						<b>C16A_2</b>					
dmin	4.2	6.2	8.5	10.2	10.0	dmin	4.4	7.0	10.5	13.9	14.9
dmed	2.4	4.0	6.3	9.7	14.3	dmed	1.7	2.8	4.4	6.6	8.9
dmax	0.6	1.3	1.7	1.3	14.7	dmax	0.1	0.1	0.1	0.3	5.1
<b>C15A_1</b>						<b>C15A_2</b>					
dmin	10.9	15.6	20.0	22.7	20.8	dmin	10.0	14.4	18.5	20.8	19.5
dmed	3.4	5.6	8.8	13.4	18.3	dmed	5.6	9.2	14.5	21.4	30.2
dmax	1.0	3.9	12.2	36.4	29.7	dmax	1.6	3.5	4.4	3.1	28.9

Tabella 12: Produttività dei diversi convertitori (MWh/year).

I risultati dell'analisi mostrano come per ogni scafo il punto di massima produttività sia frutto di una diversa combinazione di parametri. Sono presenti tuttavia dei trend, in quanto generalmente una massa di pendolo maggiore sia in grado di ottenere una produttività annua maggiore.

## 2.11 Analisi tecno economica

Per identificare la configurazione migliore del convertitore è necessario andare oltre le condizioni tecniche e introdurre un parametro tecnoeconomico quale l'LCOE (Levelized Cost Of Energy), che stima il costo dell'energia prodotta in €/kWh, a partire dalla sua produttività e dai costi a essa associati.

La Strategic Initiative for Ocean Energy (SI OCEAN) suggerisce di utilizzare le seguenti espressioni per la stima dell'LCOE:

$$LCOE = \frac{CAPEX + SLD}{8760 * LF} * CRF + \frac{OM}{8760 * LF} \quad (5.1)$$

$$LF = \frac{AEP}{8760 * R} \quad (5.2)$$

$$CRF = \frac{r * (r + 1)^n}{(r + 1)^n - 1} \quad (5.3)$$

dove:

- LCOE            [€/kWh];
- CAPEX        costo dell'impianto [€/kW];
- SLD            costo di smaltimento dell'impianto a fine vita [€/kW];
- LF             fattore di capacità dell'impianto;
- O&M          costo annuale manutentivo [€/kW];
- AEP            produttività annua [kWh];
- R              potenza nominale [kW];
- CRF            fattore di recupero del capitale;
- r                tasso di interesse;
- n                durata dell'impianto (anni).

E' stata quindi identificata una funzione di costo per ognuna delle configurazioni precedentemente analizzate, che a partire dai parametri fisici (massa del pendolo, massa dello scafo e delle zavorre necessarie a raggiungere le condizioni inerziali richieste, taglia del PTO), sia in grado di definirne il costo preliminare.

A partire dal costo stimato e dalla produttività annua valutata in precedenza è possibile calcolare il parametro LCOE per ogni combinazione di parametri di sistema. In Tabella 13 si mostrano i risultati

dell'analisi, normalizzati rispetto allo scafo C15A\_1 che garantisce il minor valore del costo dell'energia LCOE e quindi, ai fini di questa analisi di avamprogetto, la soluzione più adatta a essere migliorata e studiata maggiormente nelle fasi successive di progettazione esecutiva.

	LCOE <sub>min</sub> (€/MWh)
A23_1	1.91
A23_2	1.87
C13_1	1.47
C13_2	2.44
C15A_1	1.00
C15A_2	1.52
C16_1	2.60
C16_2	3.00

Tabella 13: Valori di LCOE normalizzati.

Di seguito sono elencate le principali grandezze geometriche e inerziali della configurazione C15A\_1.

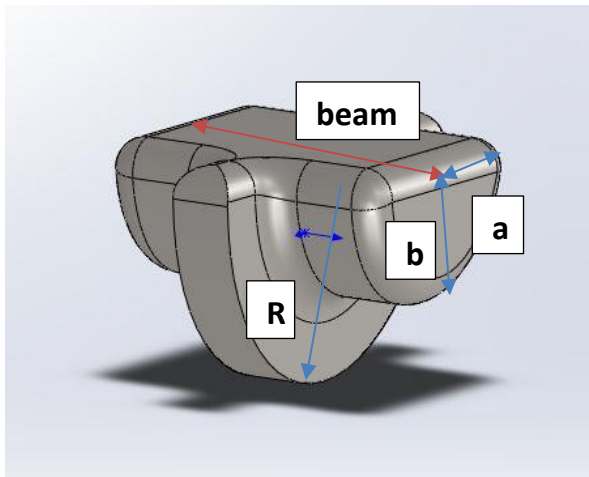


Figura 30: Scafo C15A.



R [m]	a [m]	b [m]	beam [m]	Width central part [m]	Width lateral part [m]	Submerged height [m]	Mass_simul [t]
8	5	5	10	2	4	60%	183,5

Lxx [kg m <sup>2</sup> ]	Lyy [kg m <sup>2</sup> ]	Lzz [kg m <sup>2</sup> ]	COG x [m]	COG y [m]	COG z [m]	max dimension of the pendulum [m]
1.685.911	2.364.433	2.897.631	0	0	0,518	4

Tabella 14: Parametri fisici della configurazione di ottimo C15A\_1.

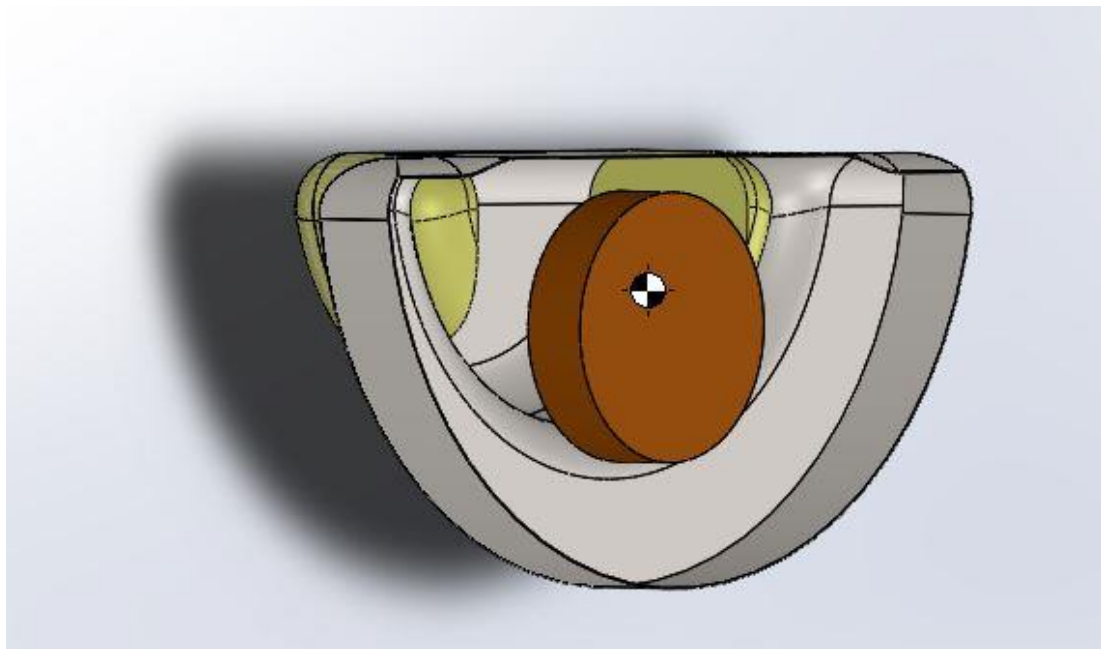


Figura 31: Sezione longitudinale dello scafo C15A\_1.

### 3 Conclusioni

Nel presente report si è mostrata la procedura di avamprogetto del convertitore Pewec in scala reale.

Nella prima parte del documento è stata descritto il modello analitico lineare e non-lineare del sistema Pewec, con riferimento alla sua validazione tramite le prove sperimentali in vasca prova a scala ridotta (1:45) e a scala intermedia (1:12), condotte durante lo svolgimento delle attività previste dall'accordo PAR negli anni 2014 e 2015.

Successivamente vengono identificate le ipotesi progettuali alla base del lavoro. La potenza nominale della macchina di riferimento è pari a 20 kW, il sito di installazione è l'Isola di Pantelleria. Vengono anche valutate le dimensioni principali dello scafo, atte a produrre la potenza desiderata in relazione al clima ondosio del sito di Pantelleria.

A partire dalla ipotesi progettuali, viene svolta un'analisi idrostatica e idrodinamica su tre diverse famiglie geometrie di scafo adatta all'applicazione. Una selezione iniziale permette di scartare alcune delle geometrie ipotizzate, in quanto instabili dal punto di vista statico. Le geometrie stabili vengono studiate dal punto di vista idrodinamico, andando ad adattarne le proprietà inerziali per ottenere una risposta dinamica favorevole al periodo dell'onda di progetto.

A seguire, viene ipotizzata una geometria del pendolo per ogni configurazione di scafo, tenendo conto dello spazio di lavoro disponibile all'interno dello scafo e del periodo di risonanza desiderato, prossimo al periodo dell'onda di progetto.

Una prima analisi con il modello lineare ha permesso di verificare la bontà delle ipotesi effettuate circa il generatore elettrico per il quale vengono rispettati i vincoli di potenza massima e coppia nominale.

Successivamente, visto l'esito favorevole dell'analisi lineare, si è proceduto all'analisi non-lineare, che ha confermato quanto visto preliminarmente e ha dato una valenza quantitativa, fornendo la produttività annua stimata sulla base della tabella delle occorrenze del sito di Pantelleria.

Per poter identificare la configurazione più adatta si è proceduto a un'analisi tecno-economica delle configurazioni di maggior rilievo evidenziate dallo studio di produttività. Si è identificato il parametro LCOE (Levelized Cost Of Energy), che definisce il costo dell'energia in €/MWh, come indicatore atto a identificare la soluzione costruttiva più competitiva.

Infine tale configurazione è stata descritta dal punto di vista geometrico e costruttivo, in modo da poter fornire le linee guida per la successiva progettazione esecutiva del convertitore.

## 4 Acknowledgments

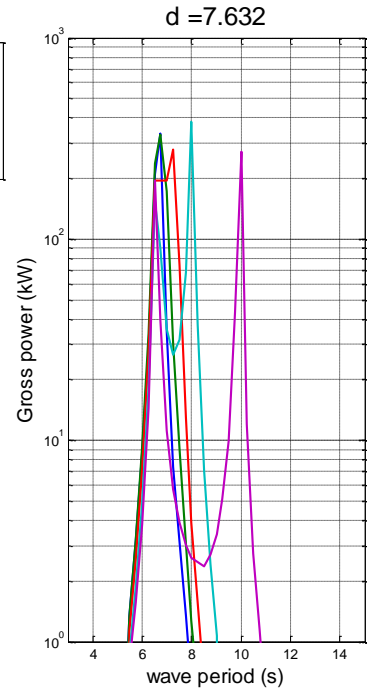
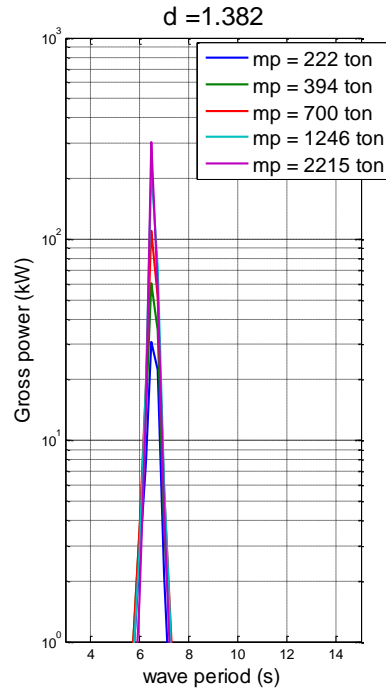
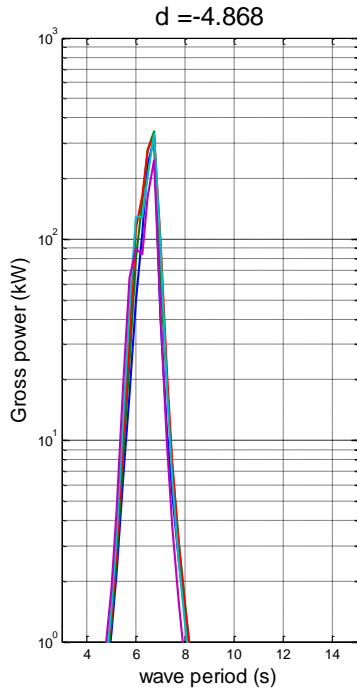
Il presente lavoro è stato svolto utilizzando il cluster HPC@POLITO del Politecnico di Torino (<http://www.hpc.polito.it>).

## 5 Riferimenti bibliografici

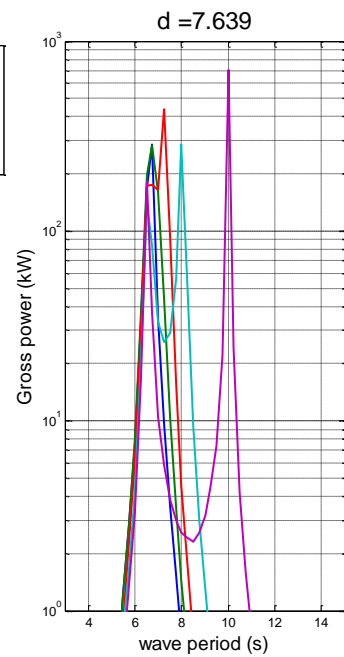
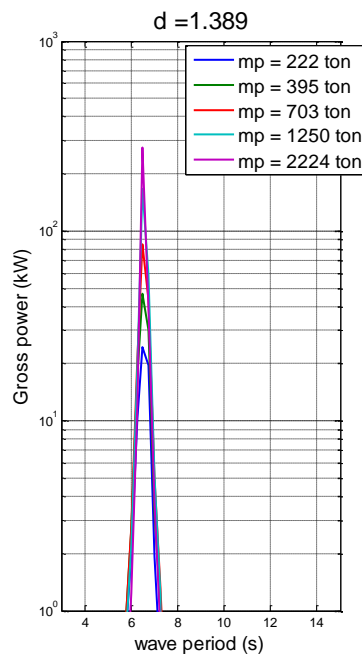
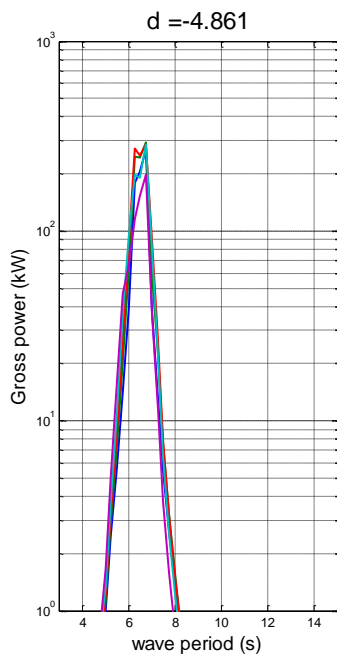
- [1] Nicola Pozzi, Modeling and testing of a Wave Energy Converter, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Ottobre 2014
- [2] Giovanni Rinaldi, Approcci fisico-matematici per lo sviluppo di dispositivi inerziali per la produzione di energia dal moto ondoso, Rapporto tecnico ENEA (in preparazione)
- [3] Simone Drocco, Analisi dinamica di un sistema per la produzione di energia da moto ondoso con architettura a pendolo, Tesi di Laurea Politecnico di Torino
- [4] Giovanni Bracco et al., A Pendulum based Wave Energy System, atti del convegno "Energia dal mare – Le nuove tecnologie per i mari italiani", ENEA 1 e 2 luglio 2014  
[http://www.enea.it/it/enea\\_informa/events/energia-dal-mare/energia-dal-mare2](http://www.enea.it/it/enea_informa/events/energia-dal-mare/energia-dal-mare2)
- [5] Stefano Roveda, EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A PENDULUM BASED INERTIAL SEA WAVES CONVERTER Bachelor Thesis, Politecnico di Torino, 2014.
- [6] Payne, Gregory. "Guidance for the experimental tank testing of wave energy converters." The University of Edinburgh, Vers. B 1 (2008).

## 6 Appendice

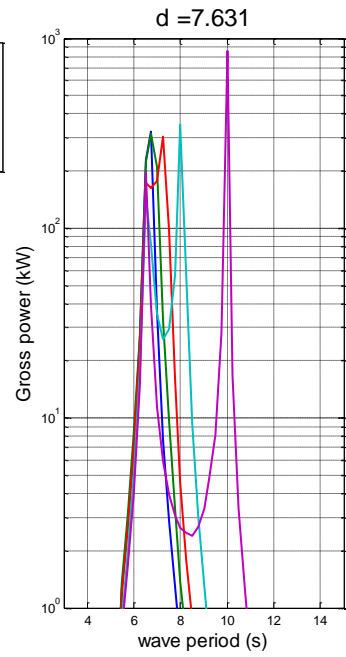
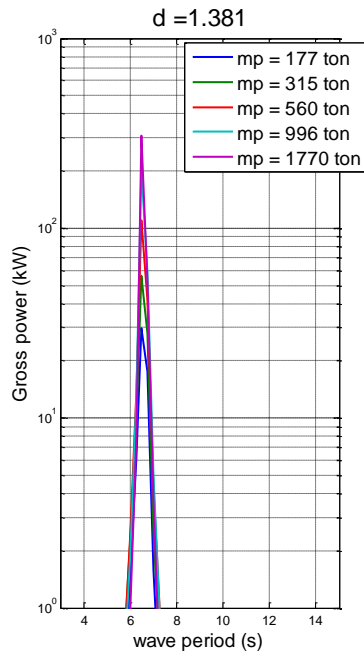
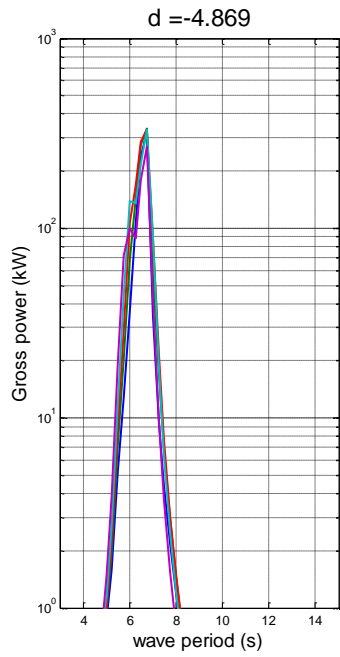
### Scafo A1consmusso



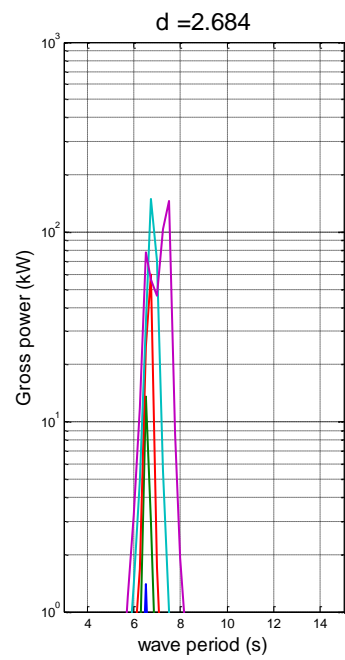
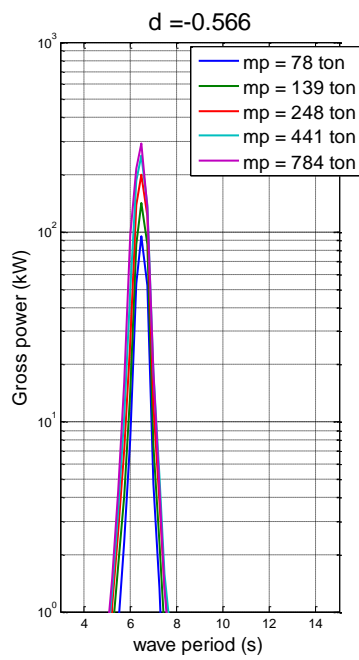
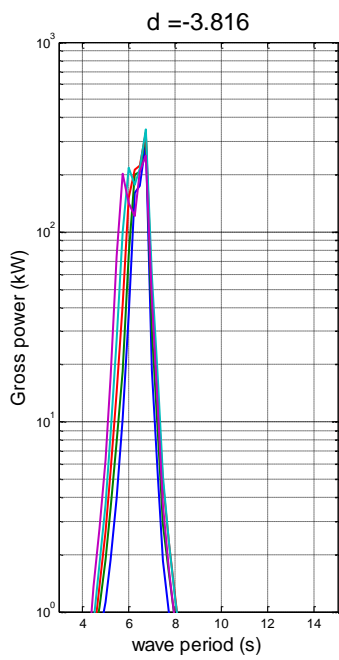
### Scafo A1senzasmusso



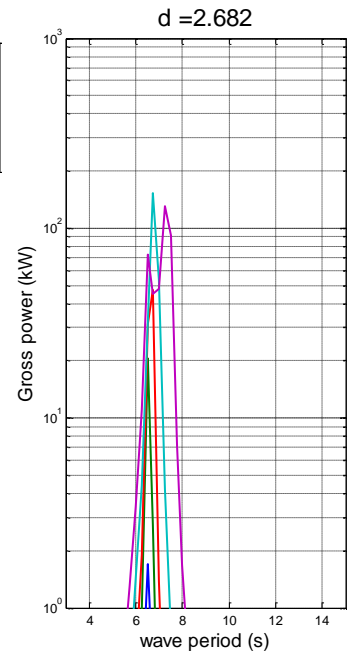
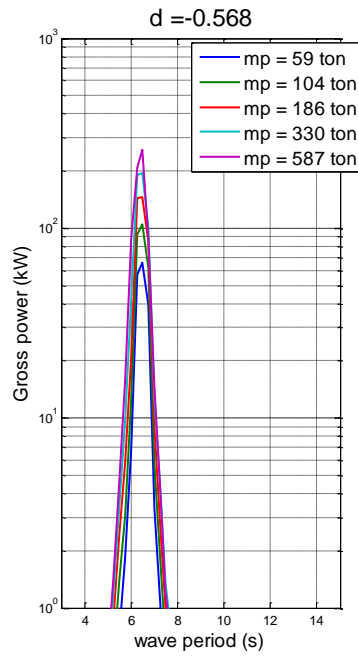
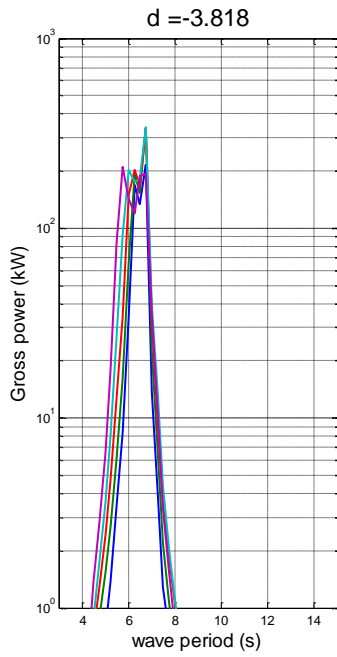
**Scafo A2**



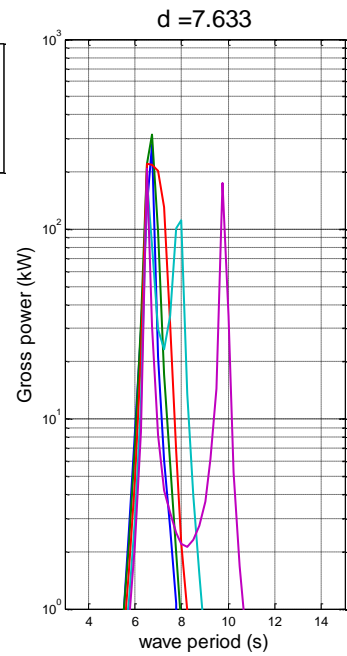
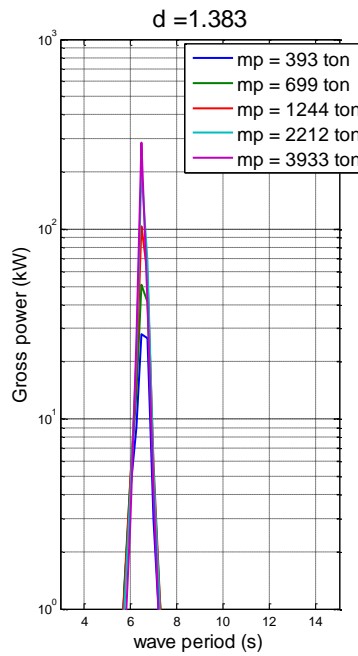
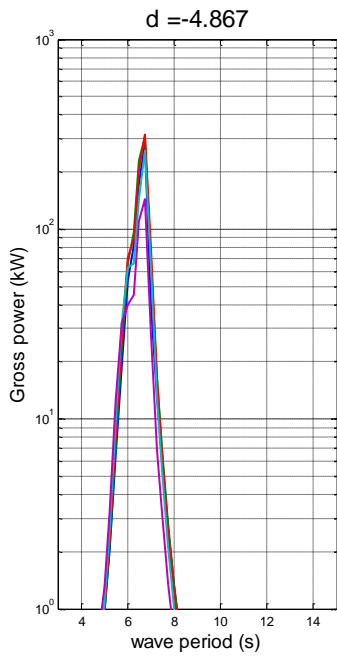
**Scafo A6**



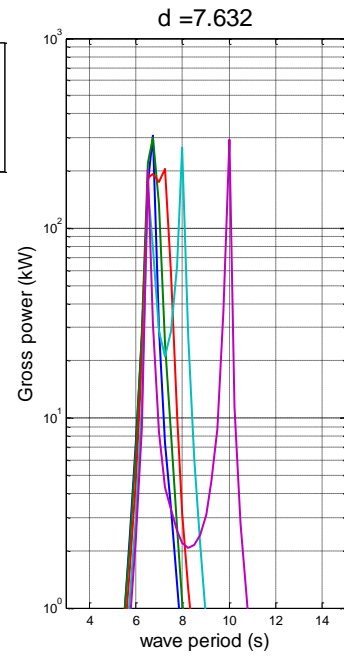
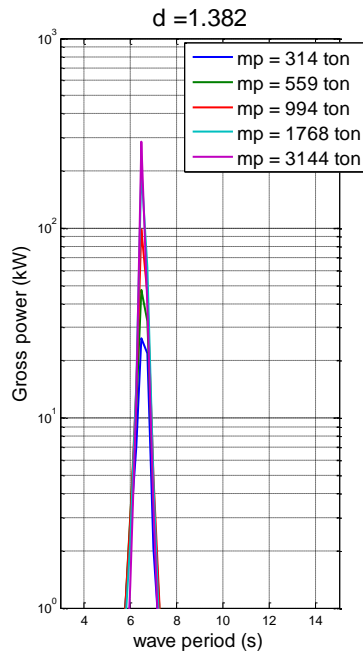
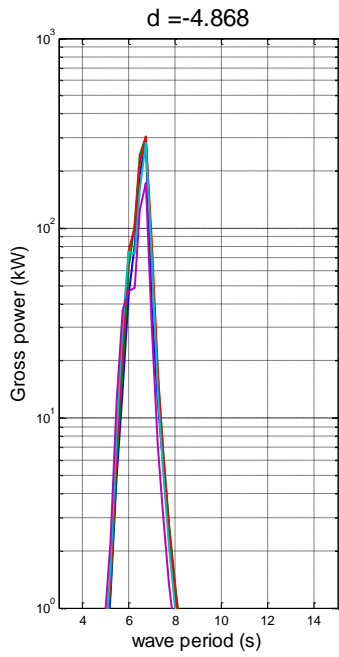
**Scafo A7**



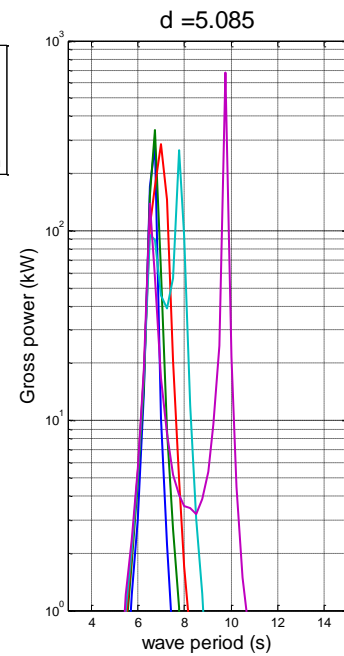
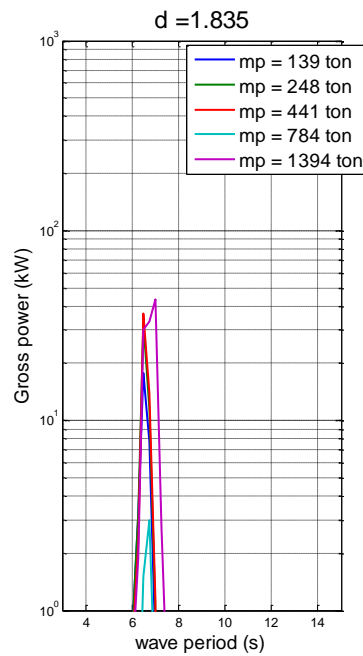
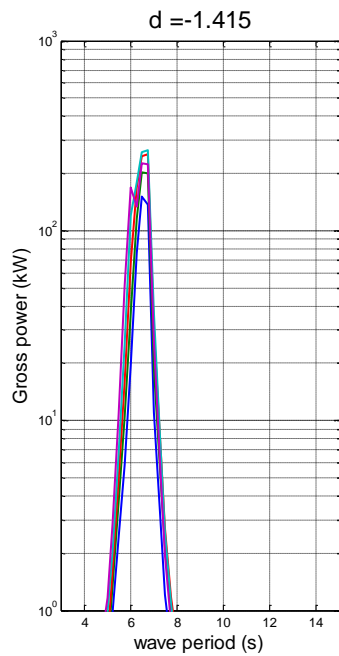
**Scafo A13**



**Scafo A14**

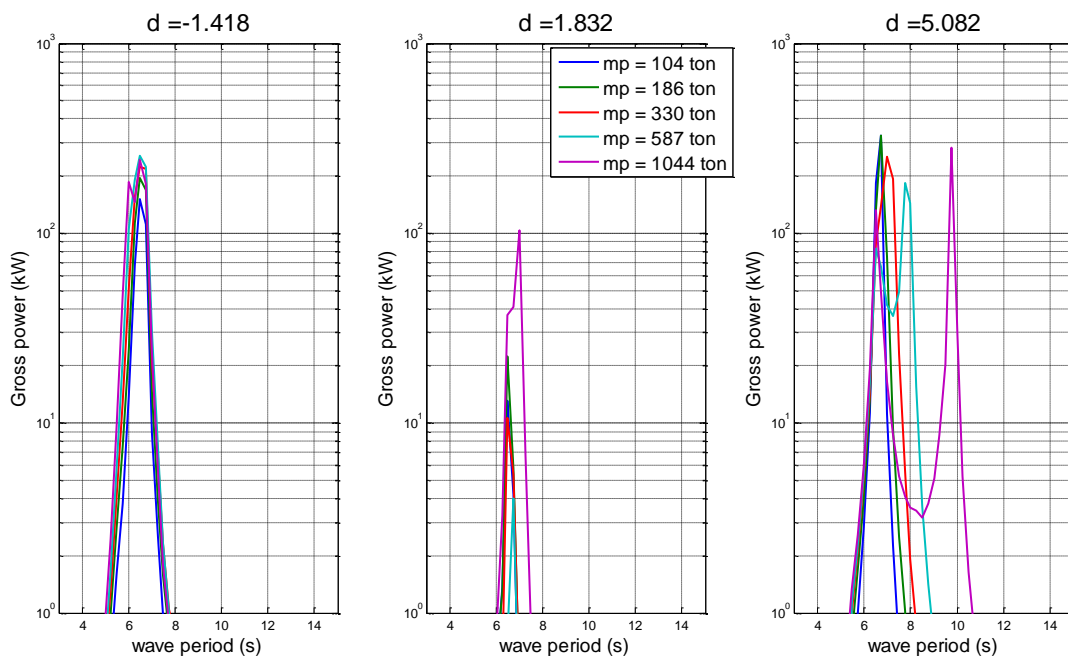


**Scafo A18**

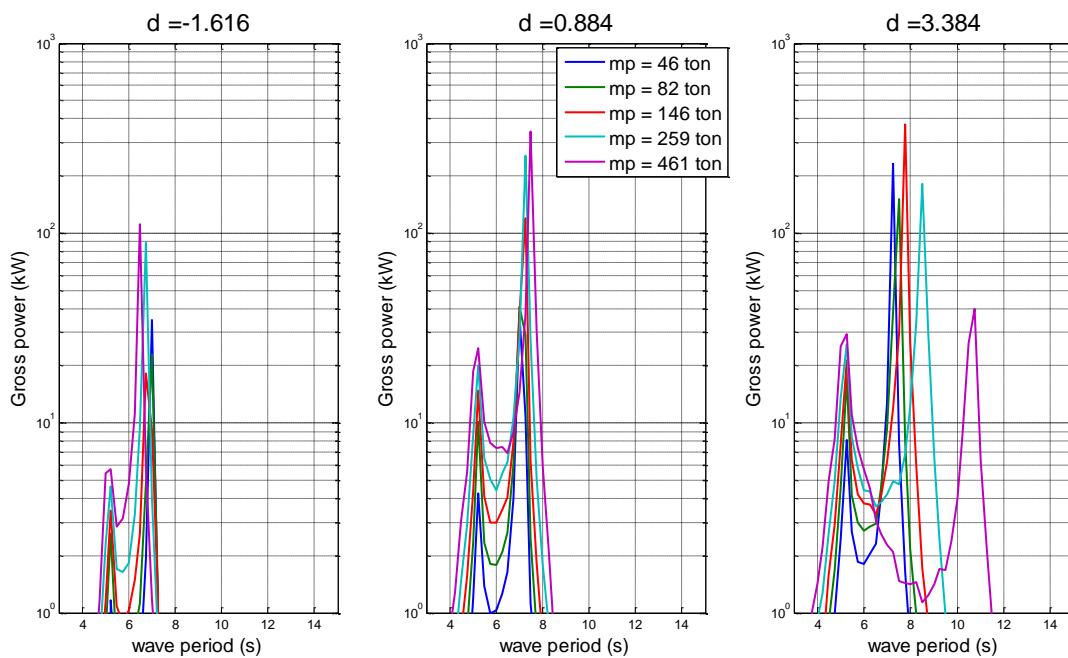




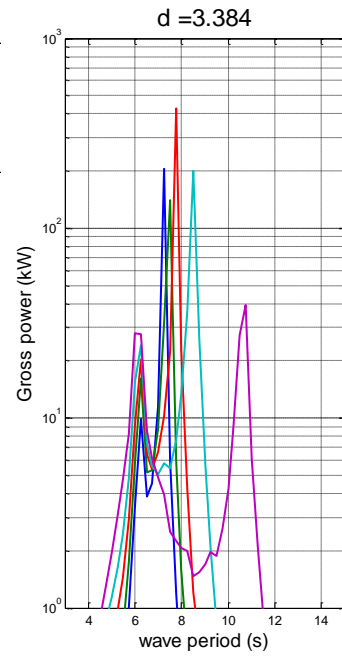
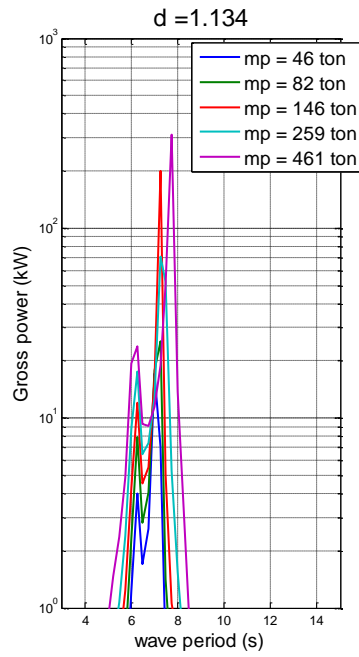
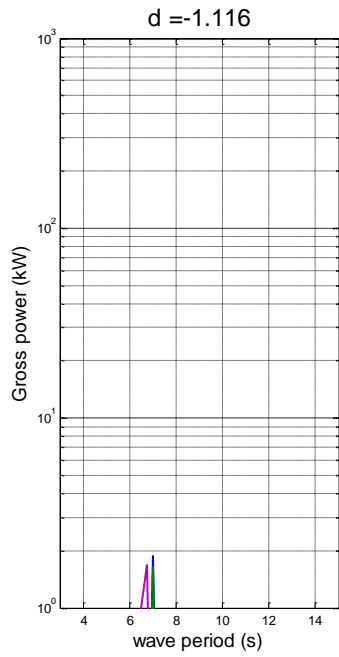
### Scafo A19



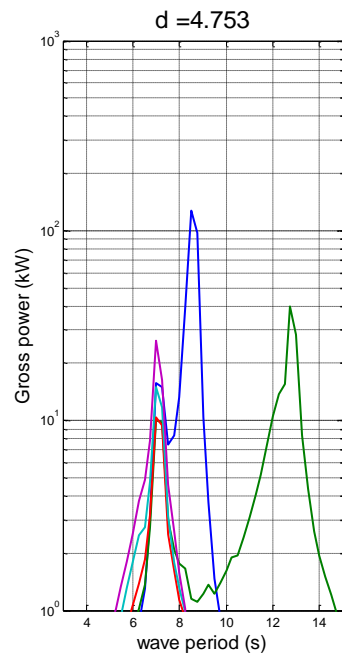
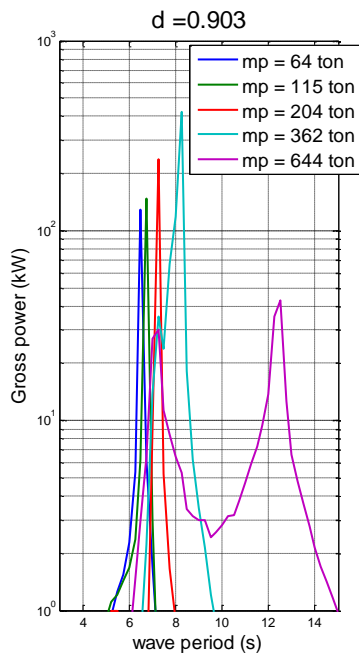
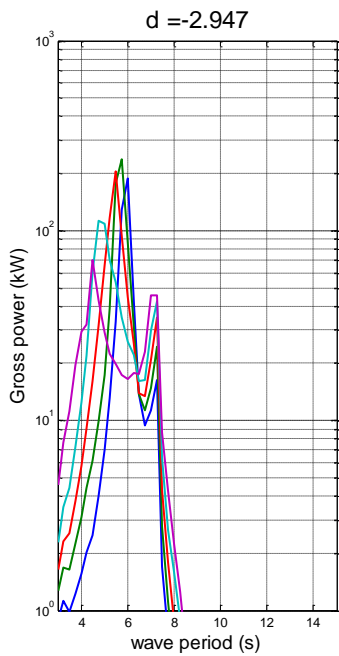
### Scafo A23<sub>1</sub>



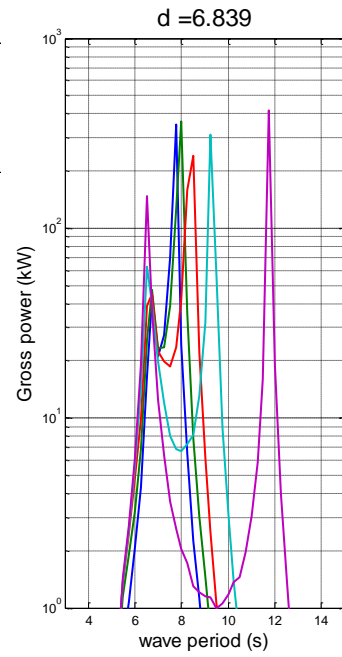
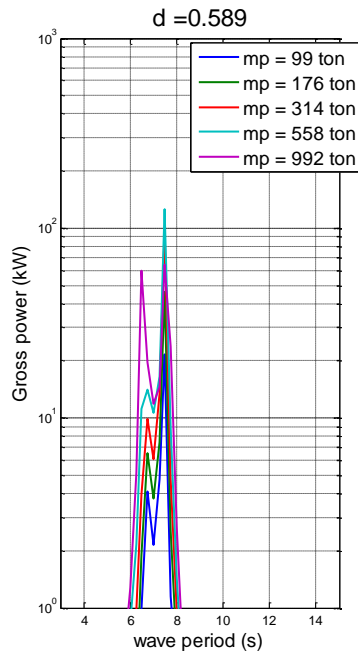
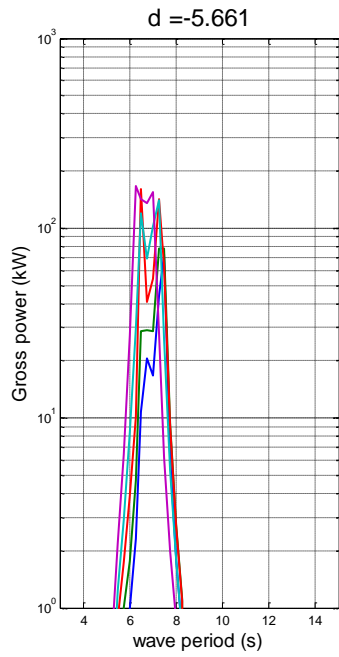
**Scafo A23<sub>2</sub>**



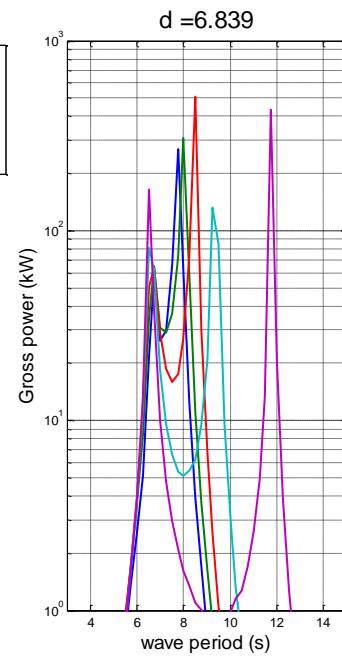
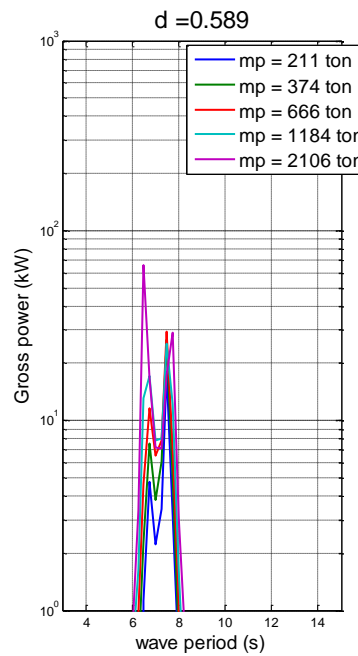
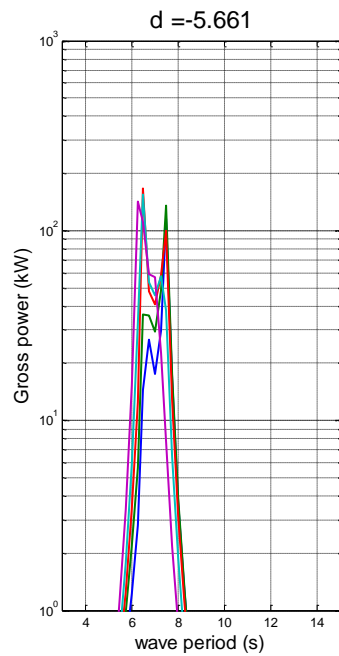
**Scafo B10**



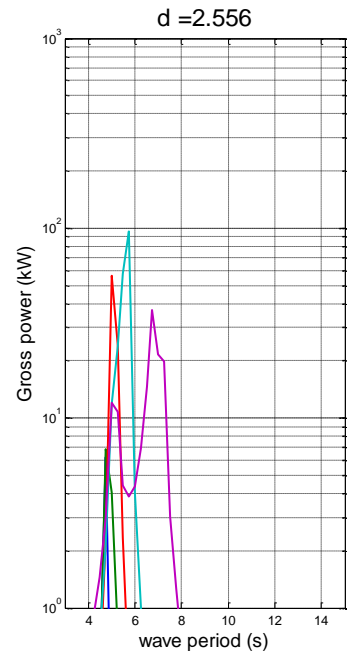
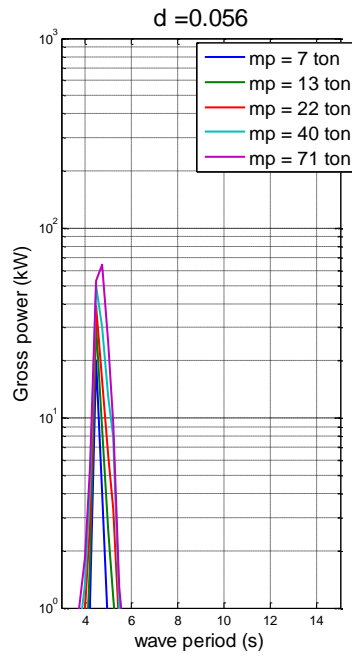
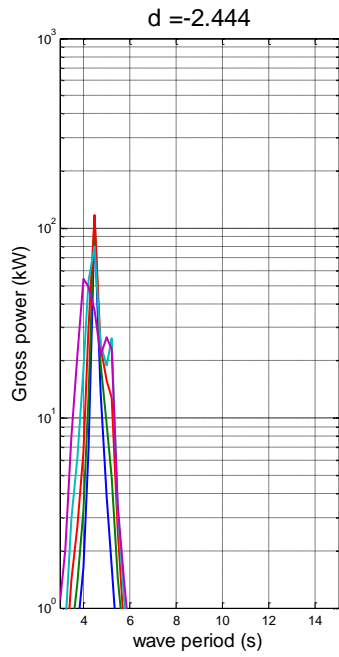
**Scafo C1**



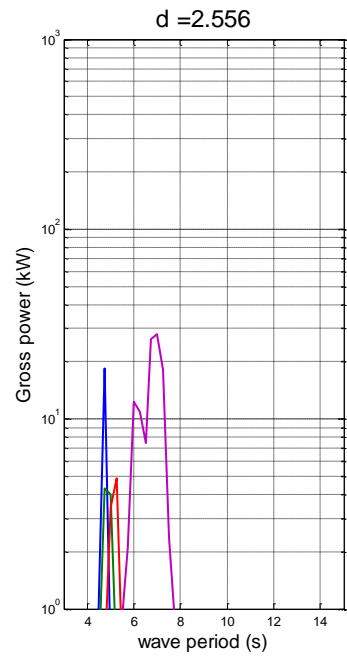
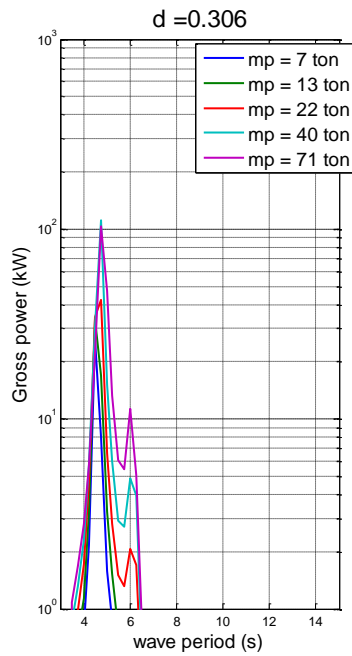
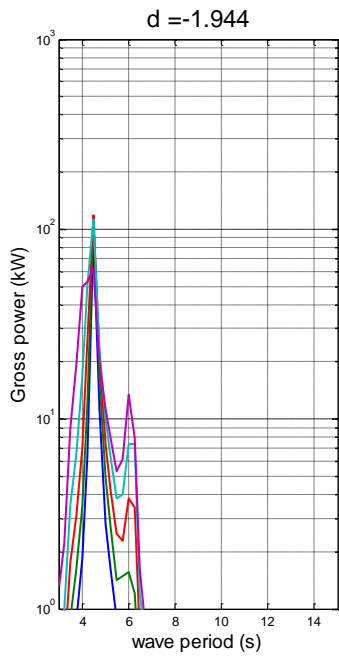
**Scafo C2**



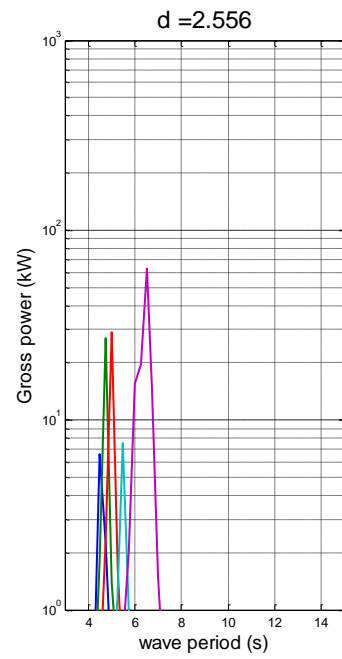
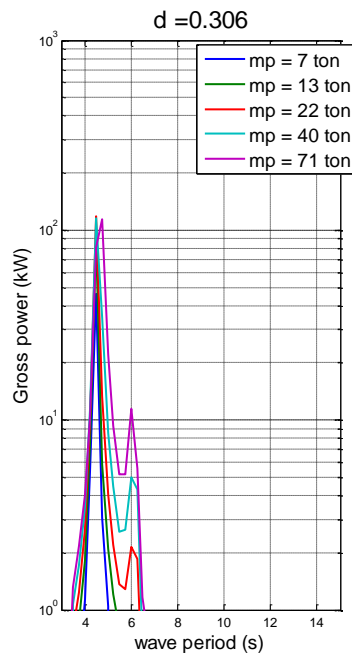
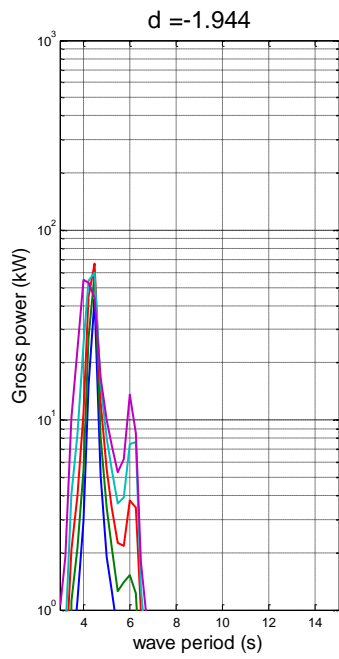
**Scafo C13<sub>1</sub>**



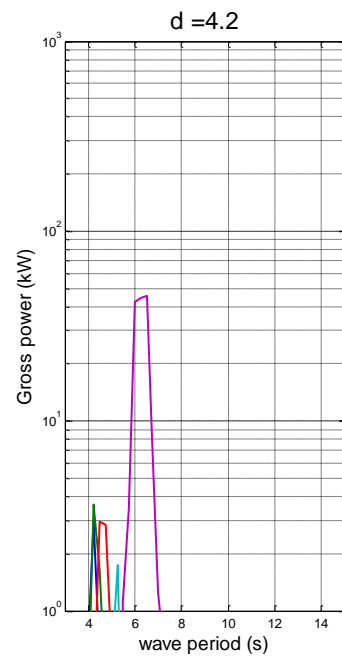
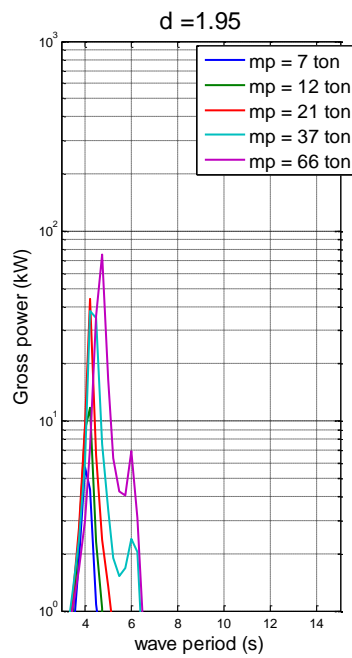
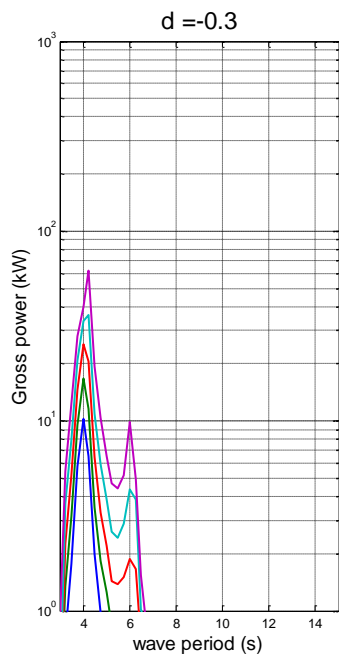
**Scafo C13<sub>2</sub>**



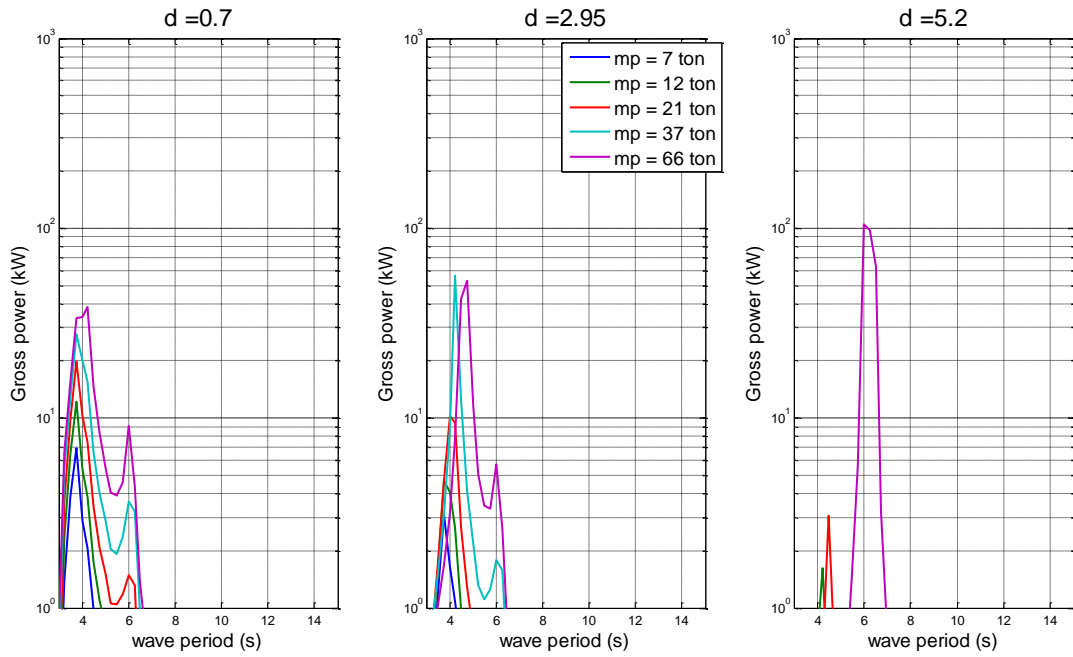
**Scafo C13A**



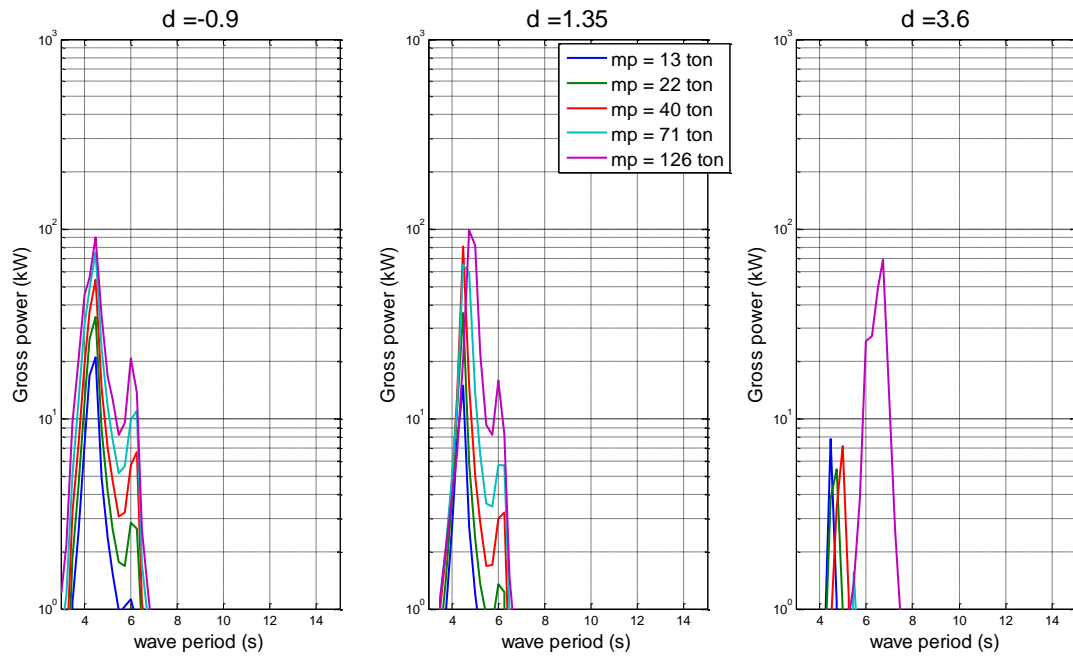
**Scafo C14B**



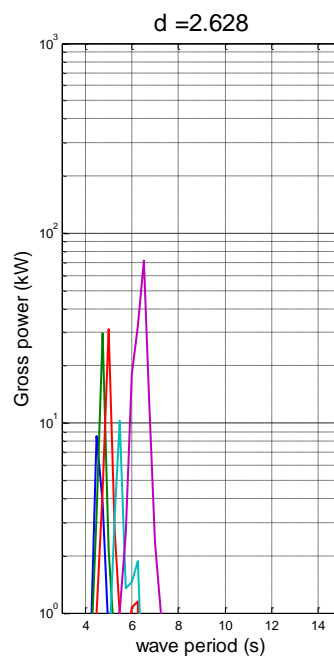
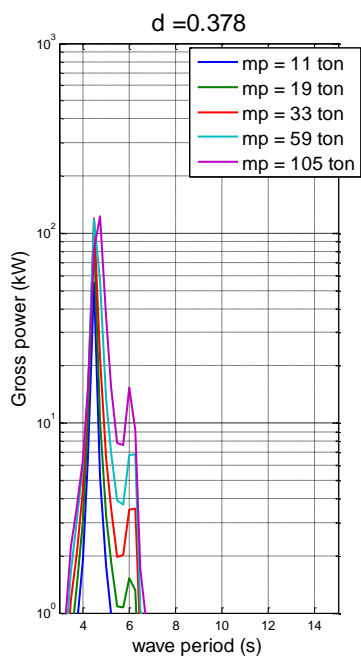
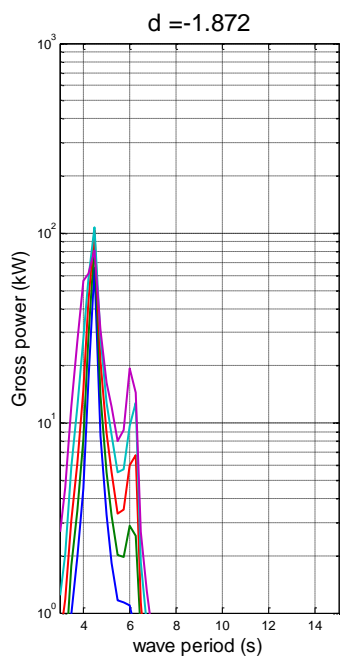
**Scafo C14C**



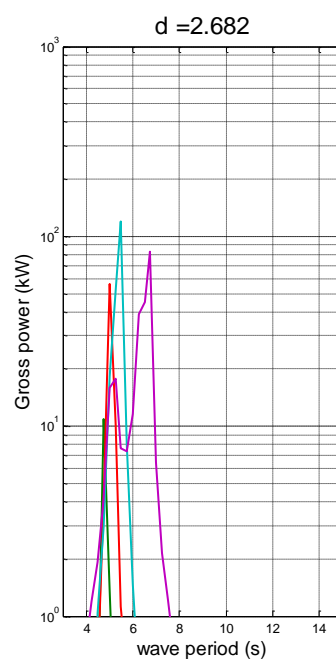
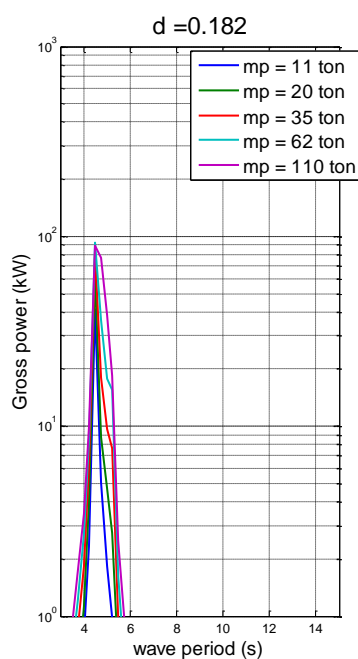
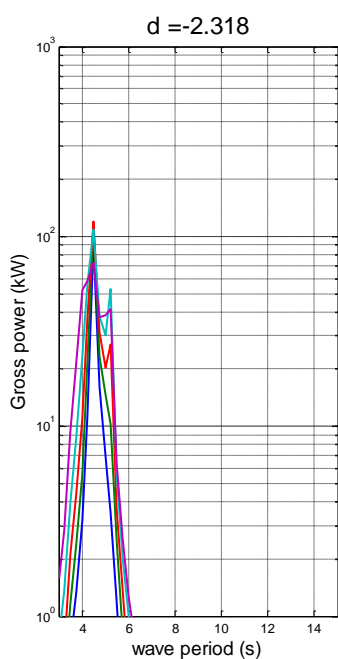
**Scafo C14F**



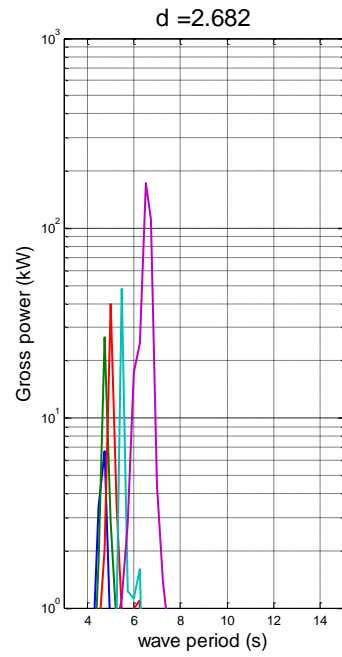
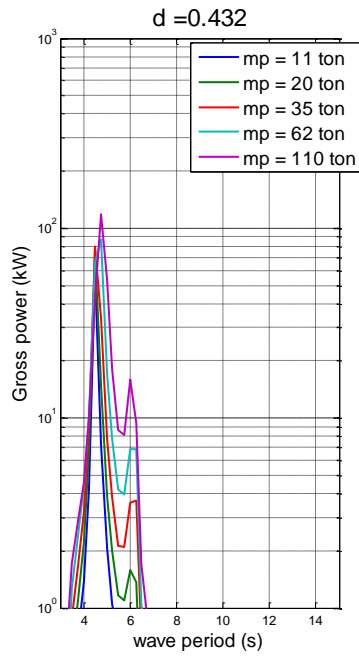
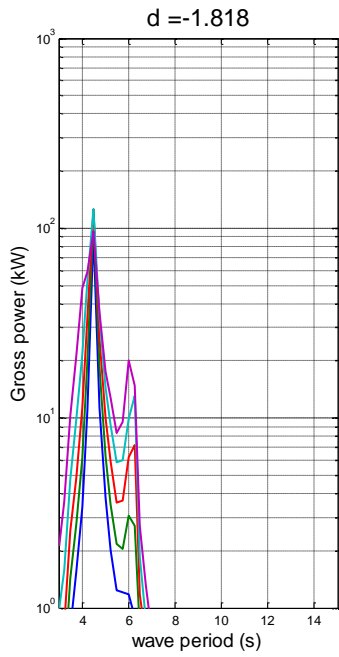
### Scafo C15



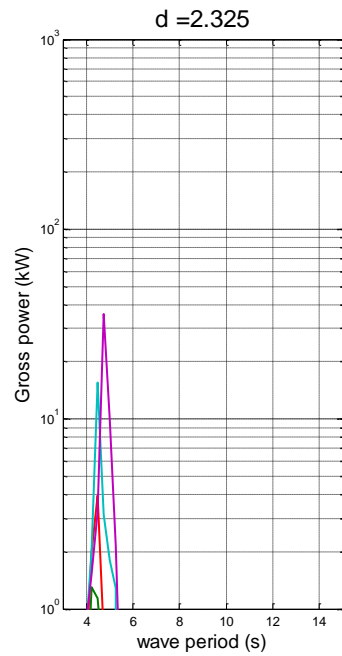
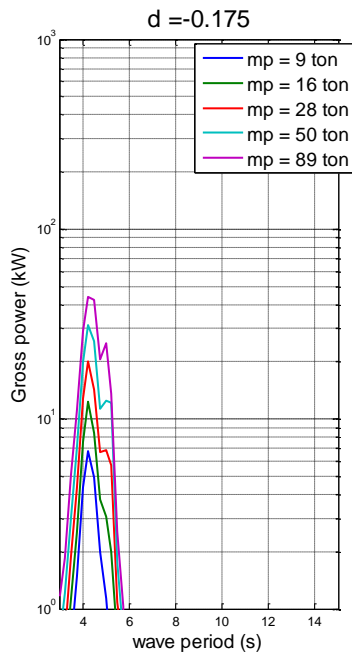
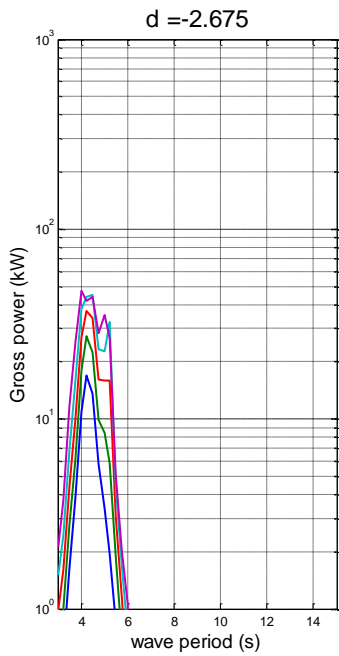
### Scafo C15A<sub>1</sub>



**Scafo C15A<sub>2</sub>**

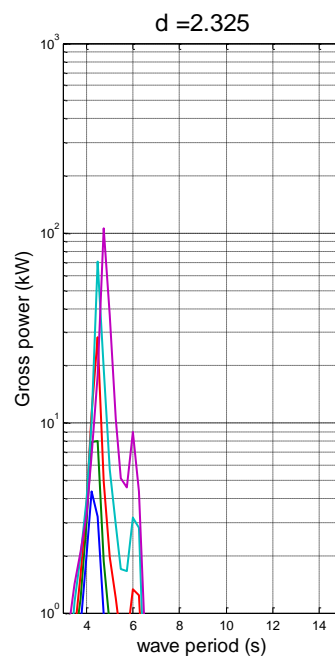
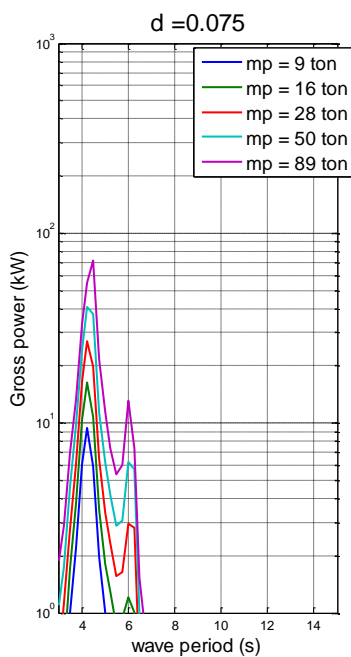
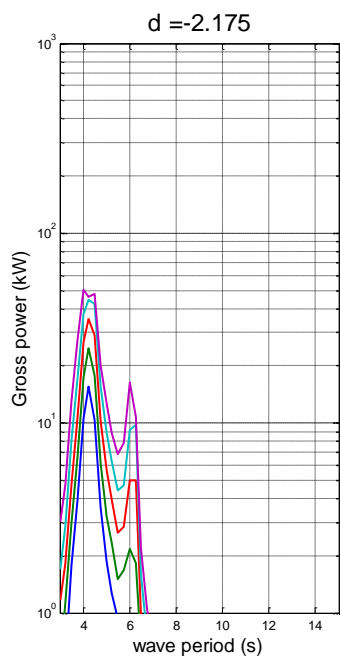


**Scafo C16<sub>1</sub>**





### Scafo C16<sub>2</sub>



### Scafo C16A<sub>1</sub>

