



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



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Ricerca di Sistema elettrico

## LA1.12: Sviluppo di algoritmi genetici per la progettazione del convertitore

S.A. Sirigu, L. Foglietta, G. Bracco, G. Mattiazzo

Report RdS/PTR(2019)/169

LA1.12: Sviluppo di algoritmi genetici per la progettazione del convertitore

S.A. Sirigu, L. Foglietta, G. Bracco, G. Mattiazzo

Aprile 2020

#### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: 1.8 Energia elettrica dal mare

Work package: Energia elettrica dal mare

Linea di attività: LA1.12: Sviluppo di algoritmi genetici per la progettazione del convertitore

Responsabile del Progetto: Gianmaria Sannino ENEA

Responsabile del Work package: Gianmaria Sannino ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Piano triennale di realizzazione 2019-2021 della ricerca di sistema elettrico nazionale*"

Responsabile scientifico ENEA: Gianmaria Sannino

Responsabile scientifico Politecnico di Torino: Giuliana Mattiazzo

## Indice

SOMMARIO.....	4
1. INTRODUZIONE.....	5
2. RICHIAMI AL MODELLO E AL LAVORO PRECEDENTE.....	5
1.1 LAVORI PREGRESSI.....	5
1.2 TECNOLOGIA E PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL DISPOSITIVO.....	5
1.2.1 <i>Scafo</i> .....	9
1.2.2 <i>PTO e sistema di controllo</i> .....	10
1.2.3 <i>Ormeggio</i> .....	11
1.3 IL MODELLO MATEMATICO.....	11
1.4 LE ONDE IRREGOLARI.....	13
2 NUOVI SVILUPPI.....	13
2.1 SITI DI RIFERIMENTO E SET DI ONDE.....	13
2.2 PARAMETRIZZAZIONE DEL DISPOSITIVO.....	16
2.2.1 <i>Scafo</i> .....	17
2.2.2 <i>Pendolo</i> .....	22
2.2.3 <i>Power Take off</i> .....	24
2.2.4 <i>Perdite</i> .....	24
2.2.5 <i>Vincoli di simulazione</i> .....	25
2.3 COSTI.....	25
2.4 STRATEGIA DI OTTIMIZZAZIONE.....	26
3 RISULTATI.....	27
3.1 N_O SARDEGNA.....	27
3.1.1 <i>Dispositivi di interesse</i> .....	31
3.2 PANTELLERIA.....	33
3.2.1 <i>Dispositivi di interesse</i> .....	36
4 CONCLUSIONI.....	38
5 BIBLIOGRAFIA.....	39
6 APPENDICE.....	40

## Sommario

Nel presente documento sono riportati i progressi finora effettuati nello sviluppo di un dispositivo Pendulum Wave Energy Converter (PEWEC) il cui scopo è quello di convertire l'energia associata al moto delle onde in energia elettrica. L'elaborato è suddiviso in diverse sezioni che rispecchiano le fasi del lavoro svolto:

1. In primo luogo, è stata studiata la risorsa ondosa ed è stato selezionato il sito di interesse.
2. È stato adottato un modello numerico validato con le precedenti prove sperimentali su un dispositivo in scala 1:12 nell'ambito del precedente accordo MISE-ENEA 2012-2014.
3. È stato definito il principio di funzionamento del dispositivo ed i suoi elementi strutturali e funzionali
4. È stato sviluppato un sistema di ottimizzazione basato su algoritmo genetico in grado di ottimizzare i parametri del dispositivo e definire un device ottimale in funzione delle condizioni di mare, dell'energia prodotta e del costo del dispositivo.
5. Sono stati analizzati i risultati di ottimizzazione e studiati i trend tecno-economici.

Per le analisi sono stati presi in considerazione 11 siti nel mediterraneo e sono stati scelti due siti campione per l'ottimizzazione di interesse energetico, la costa nord-ovest della Sardegna e Pantelleria. All'inizio del report viene ripreso il principio di funzionamento del dispositivo PeWEC e le sue peculiarità. A seguito si descrive il modello matematico che sta alla base della simulazione delle performance e dinamica del sistema e costituisce il cuore del sistema di ottimizzazione globale.

Il dispositivo PeWEC è stato opportunamente parametrizzato tramite varie assunzioni. A partire da un set di parametri il dispositivo viene univocamente definito nei suoi sottosistemi scafo, pendolo e Power Take Off (PTO). Relativamente ad ogni dispositivo quindi si associa una produttività annua tramite la simulazione del modello matematico e una funzione di costo per i tre sottosistemi in analisi.

Sono stati individuati due parametri tecno-economici da ottimizzare, uno parente del costo dell'energia l'altro un indice di efficienza di conversione dell'energia. Il problema di ottimizzazione è quindi del tipo multi-obiettivo che non genera un'unica soluzione ottima, ma un insieme di soluzioni/dispositivi ottimi.

A fine report vengono quindi analizzati opportunamente i dati di ottimizzazione evidenziando le tendenze più salienti.

## 1. Introduzione

Nell'ambito dell'energia del mare tuttora i costi dell'energia sono elevati e gli sforzi devono condurre alla riduzione di questo parametro tecno-economico.

In questo report si descrivono le metodologie di ottimizzazione tali da ridurre il costo dell'energia del dispositivo PeWEC (Pendulum Wave Energy Converter) agendo sui parametri del sistema. Il metodo di ottimizzazione adottato si basa sugli algoritmi di tipo evolutivo, basati sul concetto di selezione naturale. Questo tipo di algoritmi garantiscono la ricerca dei minimi globali, evitando così una convergenza prematura sui minimi locali.

Dato il numero di parametri coinvolti nel processo di design del convertitore, derivanti sia dalla variabilità della risorsa ondosa in termini di intensità, direzionalità e ampiezza che dal complesso problema di ormeggio teso a ottenere una caratteristica ottimale della macchina, l'impiego di soluzioni euristiche, che si fondano alla base dell'uso degli algoritmi genetici, è altamente richiesto. L'attività prevede la determinazione e l'interconnessione di tutti i parametri di base fondamentali che rappresenteranno gli individui biologici, nella filosofia costituente la natura dell'algoritmo, e in seguito dell'analisi delle soluzioni ritenute come ottime dall'algoritmo. Queste soluzioni determineranno quindi non solo la forma esterna del convertitore ma coinvolgeranno anche la distribuzione delle masse di zavorra e delle masse inerti costituenti il pendolo.

I parametri di progetto (dimensioni, masse etc) influenzano sia le prestazioni del sistema (produttività, efficienza) sia i costi del dispositivo ed è quindi necessario procedere ad una parametrizzazione del sistema. In questo lavoro, il dispositivo è suddiviso in tre macro-sottosistemi scafo, giroscopio e Power Take Off (PTO) che vengono quindi descritti tramite dei parametri da ottimizzare.

## 2. Richiami al modello e al lavoro precedente

### 1.1 Lavori pregressi

Nell'ambito dell'Accordo di Programma MiSE-ENEA 2012-2014 è stato sviluppato il modello non lineare e lineare del dispositivo PeWEC (Report RdS/PAR2014/226) in ambiente Matlab utilizzato per il progetto di un dispositivo in scala 1:45 e successivamente 1:12 (Report RdS/PAR2014/228) testato nella vasca prova INSEAN di Roma. L'attività sperimentale ha consentito la validazione dei modelli numerici che descrivono la dinamica del dispositivo. Le analisi condotte in questo nuovo progetto partono quindi dai risultati fondamentali ottenuti nel precedente lavoro, facendo anche tesoro dell'esperienza maturata nella progettazione dei due dispositivi in scala.

### 1.2 Tecnologia e Principio di funzionamento del dispositivo

PeWEC (Pendulum Wave Energy Converter) è un convertitore di energia da moto ondoso che estrae energia dalle onde tramite un pendolo installato sul uno scafo a tenuta stagna. Un apposito generatore elettrico è collegato tramite riduttore meccanico al fulcro del pendolo e l'energia meccanica del moto di pendolamento viene convertita dal generatore tramite una legge di controllo smorzante. Il dispositivo lavora quindi sul moto di beccheggio dello scafo che induce il moto oscillante del pendolo creando così un sistema funzionante a risonanza.

È previsto che il natante sia ormeggiato con ormeggio di tipo lasco sul fondo del mare tramite ancore, catene e galleggianti sommersi per soddisfare il duplice scopo di essere poco impattante durante il funzionamento del dispositivo e che garantisca la sua sopravvivenza in caso di condizione avverse di mare.

Il funzionamento di PeWEC è stato testato in collaborazione con Enea tramite prove in vasca con prototipi in scala prima 1:45 e poi 1:12 nell'ambito del Accordo di Programma MiSE-ENEA 2012-2014 (Figura 1 e Figura 2).

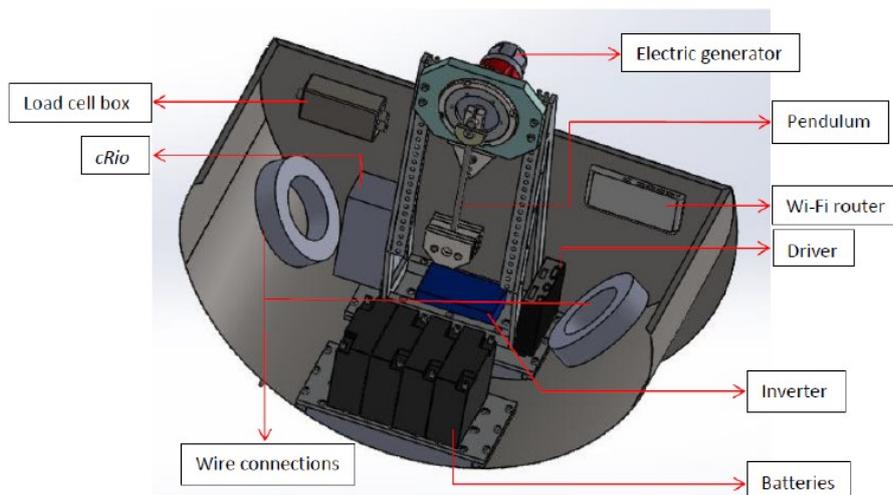


Figura 1 Rappresentazione digitale del prototipo PeWEC 1:45.

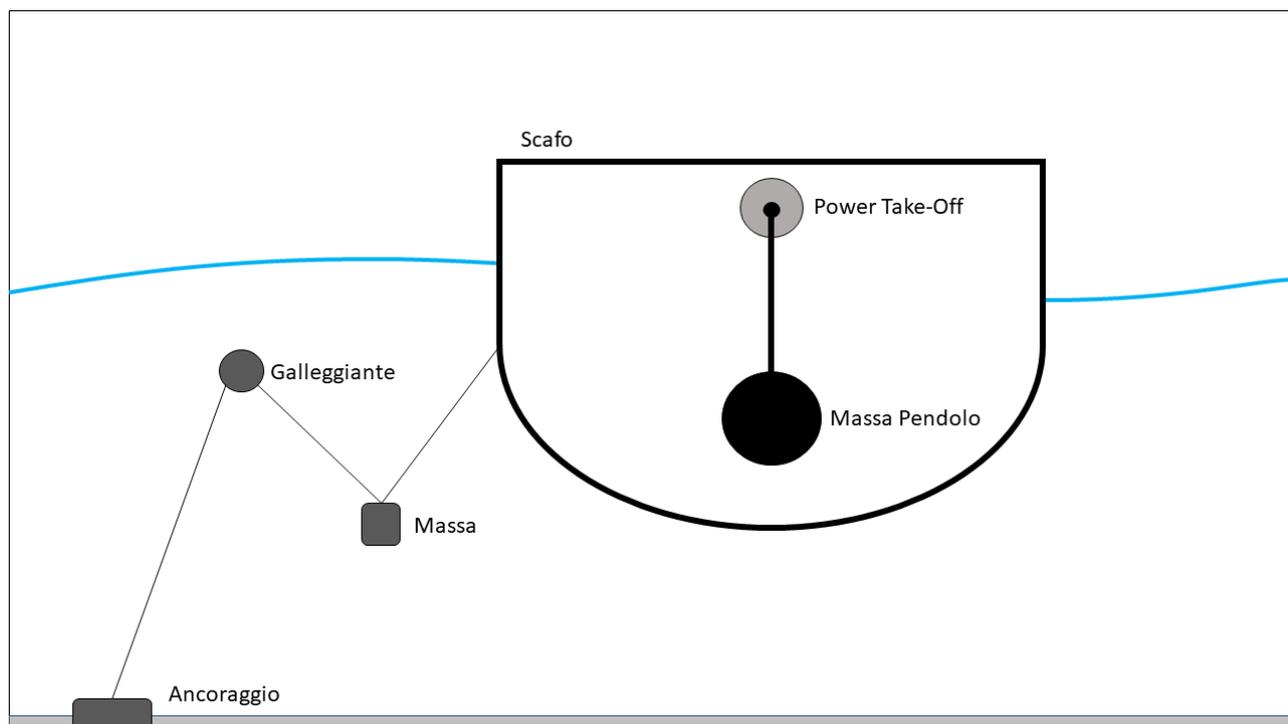


Figura 2 Prototipo 1:12 di PeWEC durante una prova sperimentale nella vasca idrodinamica di Roma INSEAN.

Si possono identificare quattro sottosistemi fondamentali:

- Lo scafo
- Il pendolo
- Power Take-Off (generatore elettrico)
- Il sistema di ormeggio

Tali componenti sono rappresentati nella seguente figura.

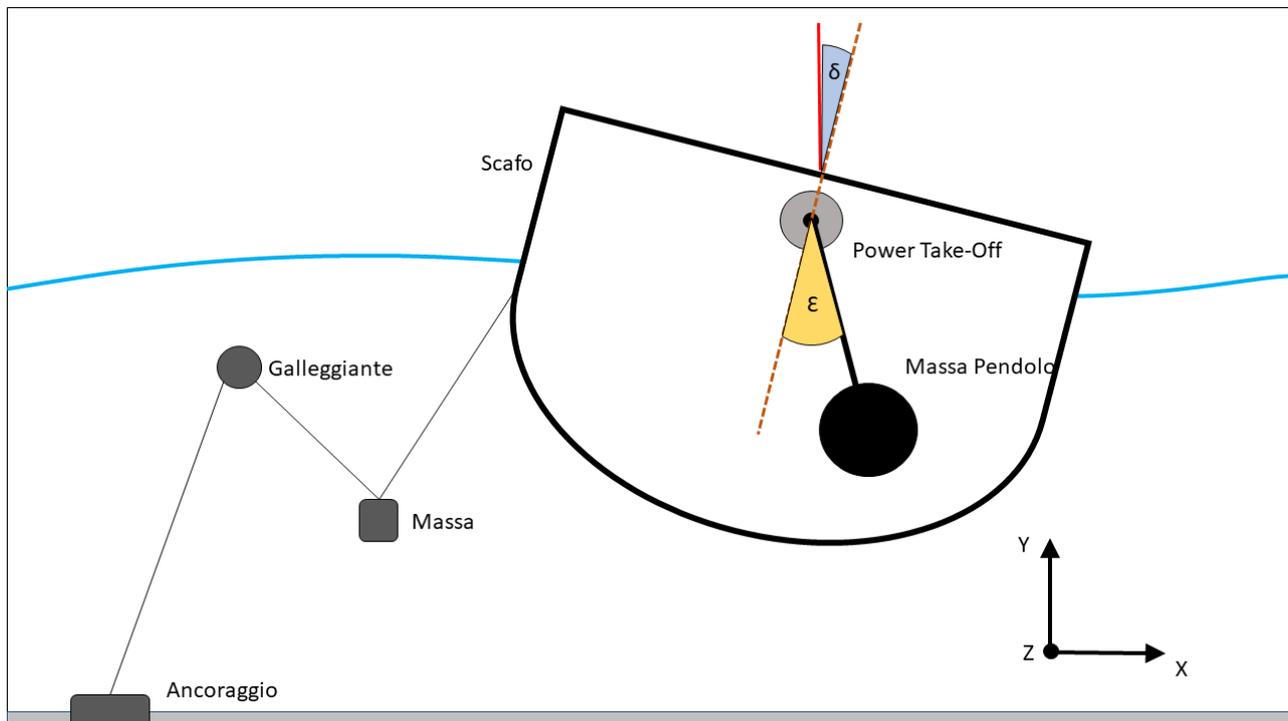


**Figura 3** rappresentazione schematica del dispositivo PeWEC.

Il processo di generazione dell'energia elettrica si basa sul moto relativo tra scafo e pendolo: quando le onde del mare impattano sullo scafo, questo viene mosso lungo i suoi tre gradi di libertà (g.d.l.):

- Traslazione lungo asse X (surge)
- Traslazione lungo asse Y (heave)
- Rotazione (pitch  $\delta$ )

conseguentemente, il pendolo posto all'interno dello scafo inizia ad oscillare liberamente, esso è, infatti, in grado di ruotare di un angolo diverso da quello dello scafo, come mostrato nella seguente figura.



**Figura 4** rappresentazione del movimento del PeWEC quando soggetto alla forza esercitata dalle onde. In blu è evidenziato l'angolo di rotazione dello scafo, in giallo è rappresentato l'angolo di rotazione del pendolo.

Sul fulcro del pendolo è posto il sistema PTO (Power Take-Off), questo è un generatore elettrico in grado di convertire il moto relativo del pendolo in energia elettrica.

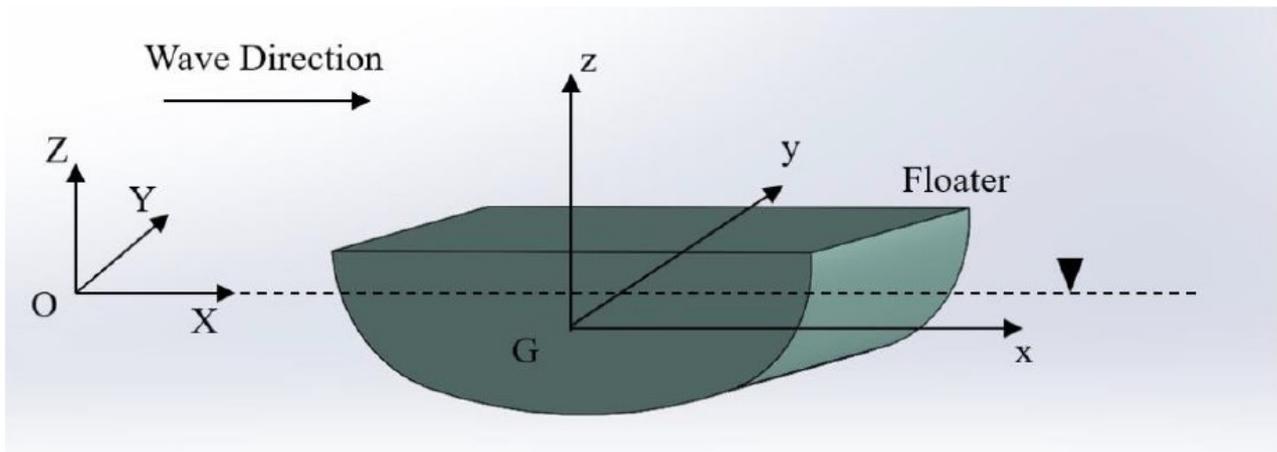
Il sistema reale, una volta realizzato, conterà di sette gradi di libertà, di cui sei necessari per definire la posizione dello scafo (3 traslazioni e 3 rotazioni) più uno per la rotazione del pendolo. Una rappresentazione matematica con tutti e sette i gradi di libertà risulterebbe molto onerosa e complessa da modellare, pertanto, in questa prima fase di analisi verranno considerati solo 4 gradi di libertà: due traslazioni dello scafo (surge e heave), una rotazione dello stesso (pitch) e la rotazione del pendolo.

### 1.2.1 Scafo

Lo scafo del PeWEC svolge la duplice funzione di proteggere le componenti interne del dispositivo e di curare l'interazione tra il dispositivo e le onde.

Per quanto riguarda la protezione degli organi meccanici ed elettrici del dispositivo, le pareti dello scafo sono saldate e sigillate in modo da evitare che acqua e umidità entrino all'interno. In questo modo si intende minimizzare tutta l'attività di manutenzione, rendendo i costi operativi più bassi. Sulla parete superiore dello scafo sono previsti dei portelloni attraverso i quali sarà possibile accedere alle parti interne ed attuare le operazioni di riparazione e sostituzione pezzi.

Come forma del dispositivo, è stata scelta una porzione di cilindro irregolare, come mostrato in figura.



**Figura 5** rappresentazione schematica dello scafo.

Questa geometria comporta molteplici vantaggi: in primo luogo, è una piuttosto semplice, ciò garantisce bassi costi di lavorazione e poco materiale coinvolto; sono sufficienti materiali semplici per garantire un'ottima solidità strutturale, l'intero scafo può essere infatti costruito in acciaio; Infine, la forma arcuata della chiglia garantisce ottime proprietà idrodinamiche della struttura.

L'interazione tra scafo e onda è un fenomeno complesso e difficile da stimare con accuratezza, inoltre il dispositivo dovrà operare in molteplici condizioni di mare; pertanto, definire a priori una forma perfetta per lo scafo non è possibile. Per ovviare a tale problema è stato costruito un codice di ottimizzazione basato su algoritmo genetico che si occupa di modificare iterativamente alcuni parametri del dispositivo finché non viene determinata la forma che garantisce il minor costo dell'energia. Di seguito vengono descritti i parametri che il codice è in grado di modificare.

Lo scafo viene costruito attraverso l'estrusione di una geometria piana ottenuta dall'intersezione di due circonferenze tangenti internamente, per maggiore chiarezza si osservi la figura seguente.

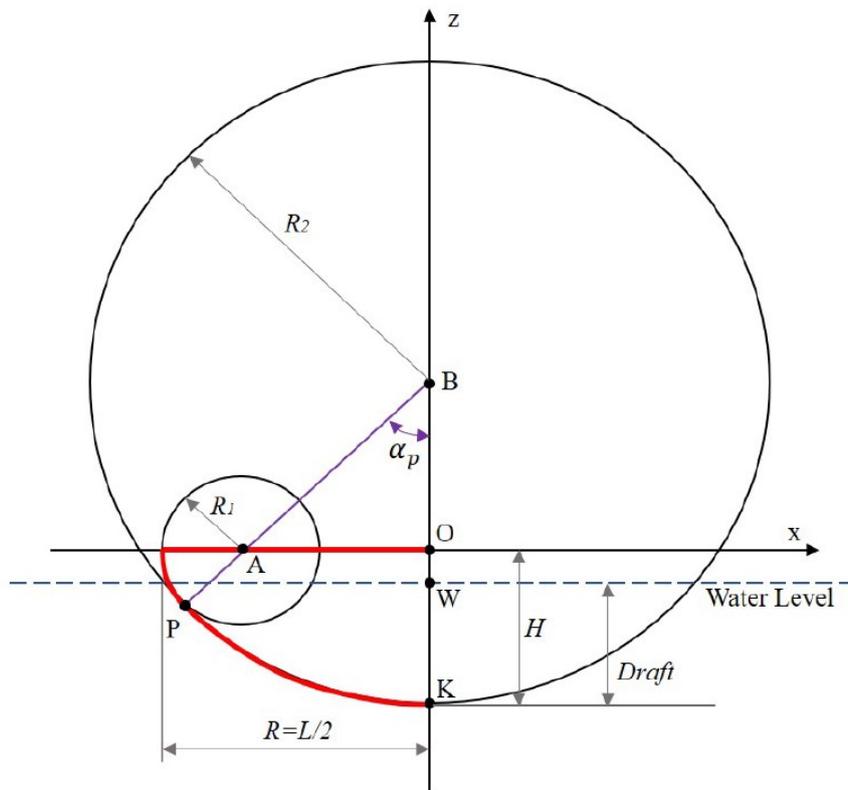


Figura 6 rappresentazione schematica dello scafo.

### 1.2.2 PTO e sistema di controllo

L'unità Power-Take-Off è un dispositivo elettronico il cui scopo è convertire l'energia meccanica, associata al moto del pendolo, in energia elettrica. Dal punto di vista costitutivo, tale oggetto è un motore elettrico a magneti permanenti ed è governato da un sistema di controllo che ne regola il funzionamento.

L'energia elettrica prodotta dal PTO viene convertita a partire da un lavoro meccanico in ingresso, tale lavoro è il prodotto dello spostamento rotativo del pendolo e di una coppia torcente resistiva esercitata dal PTO. Attraverso il sistema di controllo del PTO si è in grado di regolare la coppia torcente esercitata in modo da adattare il funzionamento del dispositivo alle varie condizioni di moto: quando si avrà mare mosso il pendolo avrà ampi movimenti che implicano grande energia, in queste condizioni si può imporre una coppia resistiva alta, che garantirà grande energia prodotta. Al contrario, in condizioni di mare calmo si avranno piccole oscillazioni del pendolo, impostare una coppia resistiva alta bloccherebbe del tutto il pendolo producendo energia nulla; in queste condizioni è quindi opportuno ridurre la coppia resistiva e consentire al pendolo di muoversi. In questo modo una produzione di energia, seppur piccola, è garantita.

La coppia esercitata dal PTO è quindi funzione di una legge di controllo che viene impostata arbitrariamente. Nei dispositivi Wave Energy Converter è tipico usare una legge tale che il comportamento del PTO sia assimilabile ad un sistema molla-smorzatore, ovvero si impone che la coppia torcente abbia due contributi: uno proporzionale allo spostamento e uno proporzionale alla velocità. Si avrà, pertanto,

$$T_k = k \cdot \varepsilon$$

$$T_c = c \cdot \dot{\varepsilon}$$

$$T = T_c + T_k$$

Dove  $\varepsilon$  è lo spostamento rotatorio del pendolo,  $\dot{\varepsilon}$  è la velocità dello stesso spostamento,  $k$  è il termine di rigidità e  $c$  è il fattore di viscosità.  $T_k$  è la componente elastica della coppia, e non consente di produrre energia; tale componente, infatti, si comporta come una molla, che restituisce tutta l'energia che accumula. Il termine  $T_c$  rappresenta, invece, la componente viscosa, questa e solo questa è responsabile di assorbire energia dal lavoro meccanico. Pertanto, la potenza istantanea assorbita è

$$P = T_c \cdot \dot{\varepsilon} = (c \cdot \dot{\varepsilon}) \cdot \dot{\varepsilon} = c \cdot \dot{\varepsilon}^2$$

Dalle formule appena mostrate si evince l'importanza di ottimizzare il fattore di rigidità  $k$  e smorzamento  $c$  ai fini di massimizzare l'energia estratta. Tuttavia, non esistono leggi matematiche note per definire a priori i valori ottimali per ogni condizione di moto, questo perché i fenomeni coinvolti sono complessi e modificare anche solo uno dei fattori comporta conseguenze difficilmente prevedibili. Per ovviare a questo problema, viene utilizzato un algoritmo di ottimizzazione basato sull'algoritmo semplice. Questo codice è in grado di determinare i valori ottimali attraverso una serie di iterazioni; grazie a precise funzioni algebriche è in grado di convergere velocemente e di determinare i valori ottimali di  $c$  e  $k$  all'interno di un intervallo definito precedentemente. I valori ottimali del sistema di controllo vengono ricalcolati per ogni condizione di moto, in modo da avere la massimizzazione dell'energia estratta mantenendo il costo del dispositivo fisso, essendo questo determinato solamente dai parametri costruttivi.

### 1.2.3 Ormezzio

Il sistema di ormezzio considerato in questa prima fase di analisi è costituito da un ancoraggio al terreno e un sistema massa-galleggiante, tutte le parti sono collegate da un cavo ad alta resistenza. Quando lo scafo si allontana dal punto di ancoraggio le tre parti di cavo tendono ad allinearsi, la massa si alza e il galleggiante si abbassa. Immediatamente si genera, in virtù di relazioni trigonometriche, una graduale forza di richiamo che riporta il dispositivo verso la posizione originale. Il principale vantaggio di questo tipo di ormezzio è quello di garantire una reazione graduale: più lo scafo si allontana dal punto di ancoraggio, maggiore sarà la forza esercitata. Se si utilizzasse un semplice cavo, questo risulterebbe non teso per la maggior parte del tempo, per essere poi impulsivamente strattinato appena il PeWEC si allontana troppo; questo genere di sollecitazioni causano forte stress sui materiali, portando ad una veloce rottura.

È da sottolineare che l'azione generata dall'ormezzio è spesso piccola rispetto a quella delle altre forze coinvolte, pertanto in prima analisi, non verrà considerata. In futuro potranno, infatti, essere considerati anche altri sistemi di ormezzio, più avanzati o più adatti al tipo di fondale in analisi.

## 1.3 Il modello matematico

Per valutare le performance del dispositivo in termini di energia prodotta e costo dell'energia è necessario simularne il comportamento. Il Politecnico di Torino in collaborazione con ENEA (Report RdS/PAR2014/226) ha sviluppato un codice in ambiente MATLAB in grado di riprodurre il comportamento del dispositivo quando questo viene investito dalle onde. Il modello numerico è stato validato tramite prove sperimentali in scala 1:12 nell'ambito dell'Accordo di programma MiSE-ENEA 2012-2014 (Report RdS/PAR2014/228). Nel presente paragrafo viene riportata la teoria alla base di questo modello, in modo da facilitare la comprensione del testo successivo; per una descrizione più dettagliata di questa teoria e della sua implementazione in ambiente MATLAB, si rimanda ai report precedenti (Report RdS/PAR2014/226, Report RdS/PAR2014/227, Report RdS/PAR2014/228).

Ai fini dell'ottimizzazione è necessario avere un modello numerico che possieda un buon compromesso fra affidabilità dei risultati e ridotti costi computazionali data la necessità di un numero elevato di simulazioni. Per questo motivo, è stato adottato un modello lineare nel dominio della frequenza (Frequency Domain Model).

Il moto di un oggetto galleggiante sottoposto a forzante armonica può essere infatti descritto, nel dominio delle frequenze con la formula di Cummins in forma matriciale (Cummins 1962):

$$(\mathbf{M} + \mathbf{A}(\omega))\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{B}(\omega)\dot{\mathbf{X}} + (\mathbf{k}_h + \mathbf{K}_p)\mathbf{X} = \mathbf{F}_e(\omega) + T_{PTO}$$

Dove  $\mathbf{X}$  è il vettore che descrive il moto del dispositivo lungo i suoi gradi di libertà,  $\mathbf{M}$  è la matrice di massa del dispositivo,  $\mathbf{A}$  è la matrice di *Added Mass*,  $\mathbf{B}$  è la matrice di *Radiation Damping*,  $\mathbf{K}_h$  è la matrice di rigidità idrostatica,  $\mathbf{K}_p$  la matrice di rigidità dovuta al pendolo, e  $\mathbf{F}_e$  è il vettore delle forzanti armoniche derivanti dalle onde e  $T_{PTO}$  è l'azione del Power Take Off. La matrice di massa può essere calcolata note le caratteristiche fisiche del dispositivo, mentre le matrici  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{k}_h$ , ed il vettore  $\mathbf{F}_e$  possono essere calcolate usando diversi codici idrodinamici come ANSYS o WAMIT, nella presente analisi il software open-source NEMOH (Babarit 2015) è stato selezionato per l'analisi. Questa formulazione, tuttavia, presenta notevoli limitazioni: è valida solo sotto le ipotesi di fluido perfetto e forzante monocromatica, è ristretta al dominio delle frequenze e non consente di considerare contributi non lineari.

Assumendo onde monodirezionali e moto planare dello scafo, si identificano i 3 gradi di libertà di avanzamento ( $x$ ), sussulto ( $z$ ) e beccheggio ( $\delta$ ) e il grado di libertà di oscillazione del pendolo ( $\epsilon$ ). Quindi il vettore di stato  $\mathbf{X}$  avrà dimensione 4:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ z \\ \delta \\ \epsilon \end{bmatrix}$$

L'azione del PTO agisce sul grado di libertà di oscillazione del pendolo  $\epsilon$  applicando un termine di rigidità e un termine di smorzamento:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -k_{PTO}\epsilon - c_{PTO}\dot{\epsilon} \end{bmatrix}$$

L'accoppiamento fra pendolo e scafo è rappresentato da una matrice di rigidità  $\mathbf{K}_p$  e una matrice di forze inerziali  $\mathbf{M}$ :

$$\mathbf{K}_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -gm_p(d-l) & gm_p l \\ 0 & 0 & gm_p l & gm_p l \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} (M + m_p) & 0 & m_p(d-l) & -m_p \\ 0 & (M + m_p) & 0 & 0 \\ m_p(d-l) & 0 & I_y + I_p + m_p(d-l)^2 & I_p + m_p l^2 - m_p dl \\ -m_p l & 0 & I_p + m_p l^2 - m_p dl & I_p + m_p l^2 \end{bmatrix}$$

Dove  $M$  e  $I_y$  sono la massa e l'inerzia dello scafo a beccheggio,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $d$  è la distanza tra il fulcro del pendolo e il centro di gravità del dispositivo,  $l$  è la lunghezza del pendolo,  $m_p$  è la massa del pendolo e  $I_p$  il suo momento d'inerzia baricentrico.

Il sistema di ormeggio qui non è stato introdotto in quanto richiederebbe un modello di tipo non lineare. Lo studio e ottimizzazione del sistema di ormeggio verrà quindi condotto a valle dell'ottimizzazione; il focus dell'ottimizzazione è quindi l'identificazione della forma dello scafo, distribuzione delle inerzie (tramite zavorre) e del pendolo/i.

Il modello lineare può essere quindi risolto in maniera efficace nel dominio della frequenza e per ogni onda i parametri di controllo  $k_{PTO}$  e  $c_{PTO}$  sono ottimizzate tramite algoritmo semplice in modo da massimizzare la potenza netta estratta rispettando i vincoli imposti sull'ottimizzazione. È importante far notare che l'ottimizzazione del controllo su ogni onda è separato dall'ottimizzazione genetica effettuata sui parametri

del dispositivo. L'ottimizzazione genetica agisce sui parametri di sistema, e, successivamente, per ogni dispositivo/individuo generato, i parametri di controllo vengono ottimizzati per ogni onda scelta rappresentativa delle scatter.

## 1.4 Le onde irregolari

Le onde del mare vengono spesso rappresentate come armoniche perfette, sebbene questa rappresentazione semplificata sia adatta a comprendere la natura armonica delle onde essa è in realtà incompleta. Le onde del mare vengono infatti generate da diversi fenomeni, per lo più venti e tempeste; definito un punto del mare, su di esso confluiscono le onde risultanti da diversi fenomeni e ogni onda sarà caratterizzata dalla sua ampiezza, direzione e fase. Per una migliore comprensione del fenomeno si osservi la figura di seguito.

Di seguito è esposta la teoria utilizzata per calcolare le forzanti che le onde irregolari esercitano sullo scafo. Prima di tutto si assume uno spettro energetico di tipo Jonswap. Questa assunzione, particolarmente adatta a mari chiusi come il Mediterraneo, consente di calcolare la distribuzione delle armoniche da sovrapporre a partire da solo due valori registrati: Ampiezza caratteristica e periodo caratteristico. Una volta note con esattezza le armoniche da sovrapporre, ovvero una volta che sono ben definiti i valori di ampiezza e periodo, è possibile sommare i vari contributi: l'onda irregolare risultante verrà calcolata con la seguente formula:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^n a_i \sin(\omega_i t + \theta_i)$$

Dove:

- $n$  è il numero di armoniche che vengono sovrapposte;
- $\omega_i$  e  $\theta_i$  sono la frequenza angolare e la fase della componente  $i$ -esima;
- $a_i$  è l'ampiezza della  $i$ -esima componente armonica e può essere valutata come

$$a_i = \sqrt{2S_{\eta_i} \Delta\omega}$$

Con

- $S_{\eta_i}$  densità energetica spettrale della componente  $i$ -esima. Viene valutato una volta noti i valori di altezza dell'onda caratteristica e periodo caratteristico registrati durante le campagne sperimentali e assumendo una curva di densità spettrale sul modello JONSWAP.
- $\Delta\omega$  risoluzione di frequenza, ovvero l'ampiezza dell'intervallo considerato per selezionare un numero discreto di frequenze

Le forze associate a questa onda irregolare vengono calcolate con la seguente formula.

$$F_{Wj}(t) = \sum_{i=1}^n |f_{FKji}| a_i \sin(\omega_i t + \theta_i + \angle f_{FKji})$$

Dove

- $J$  è il grado di libertà per cui si sta valutando la forza
- $i$  è l'indice che individua la componente  $i$ -esima delle armoniche da sovrapporre
- $f_{FKji}$  è il coefficiente complesso di Freude-Krylov per il  $j$ -esimo grado di libertà, questo viene calcolato attraverso il software NEMOH.

## 2 Nuovi sviluppi

### 2.1 Siti di riferimento e set di onde

I siti di interesse nel Mediterraneo per la valutazione della produttività del dispositivo PeWEC sono riportati in Figura 7.

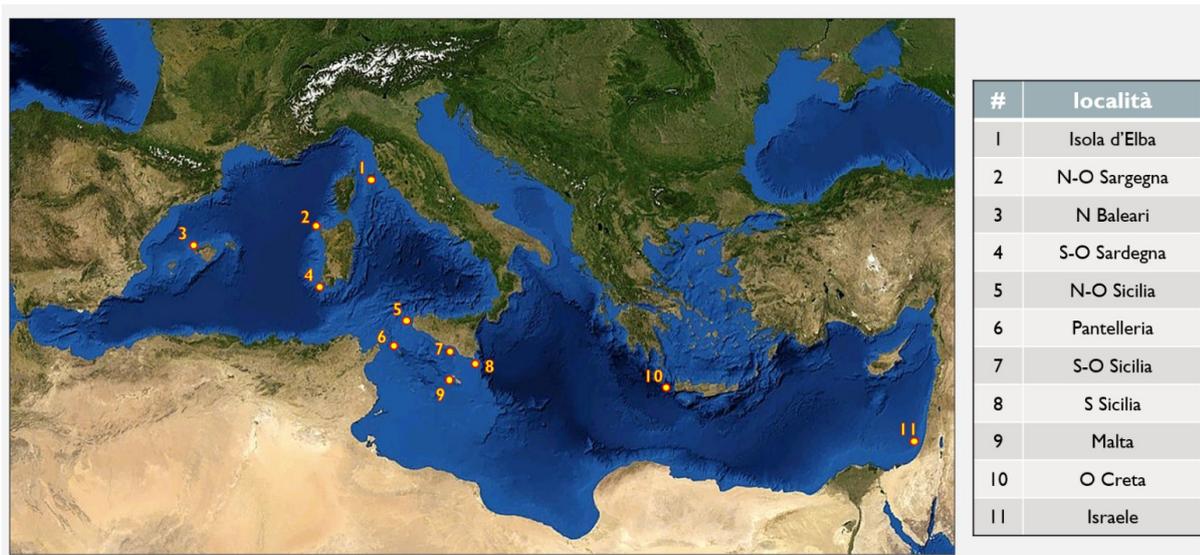


Figura 7 Geolocalizzazione dei siti di interesse nel Mar Mediterraneo

I siti scelti sono rappresentativi di varie zone climatiche all’interno del Mar Mediterraneo e pertanto presentano diverse caratteristiche di risorsa ondosa e maggiori dettagli sono presenti nel deliverable della linea di attività LA 1.4 sull’analisi della risorsa. In Tabella 1 sono riportati i valori della densità di energia dei vari siti per i vari anni di analisi.

Tabella 1 Valori di densità di potenza per i siti di interesse per i vari anni in analisi

Anno	Power density kW/m						2014 - 2019
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
P01 Isola D Elba	0.94	0.66	1.03	0.90	1.10	1.19	0.97
P02 N O Sardegna	6.15	6.83	6.50	8.36	6.23	9.10	7.20
P03 N Baleari	1.52	2.03	1.60	2.25	1.68	2.19	1.88
P04 S O Sardegna	4.54	5.70	4.62	6.18	4.48	7.26	5.46
P05 N O Sicilia	2.70	2.79	2.82	2.56	3.20	3.63	2.95
P06 Pantelleria	4.12	5.42	3.88	4.40	4.46	5.96	4.71
P07 S O Sicilia	2.09	2.40	2.19	1.97	2.48	2.74	2.31
P08 S Sicilia	2.69	2.86	3.00	2.26	2.92	3.56	2.89
P09 Malta	3.98	5.08	4.15	4.31	4.84	5.84	4.71
P10 O Creta	2.55	3.75	3.60	2.91	4.11	5.23	3.70
P11 Israele	1.24	2.35	2.61	1.73	2.48	2.43	2.15

I siti di interesse dal punto di vista energetico sono la costa Ovest della Sardegna, in particolare la costa Nord-Ovest e l’isola di Pantelleria. Per questo motivo l’ottimizzazione del dispositivo PeWEC si concentra su questi due siti, e la produttività verrà calcolata anche sugli altri siti di interesse.

Data l’eterogeneità dei siti, e quindi delle caratteristiche climatiche del moto ondoso, è necessario scegliere un set di onde rappresentative per tutti i siti in analisi. È da tener presente che un numero elevato di onde rappresentative comporta una maggiore affidabilità del risultato, ma anche costi computazionali elevati.

È stato quindi elaborato un algoritmo per la scelta delle onde in modo tale da coprire la maggior parte delle occorrenze sui vari siti ed è stato ottenuto un set di 98 onde rappresentative.

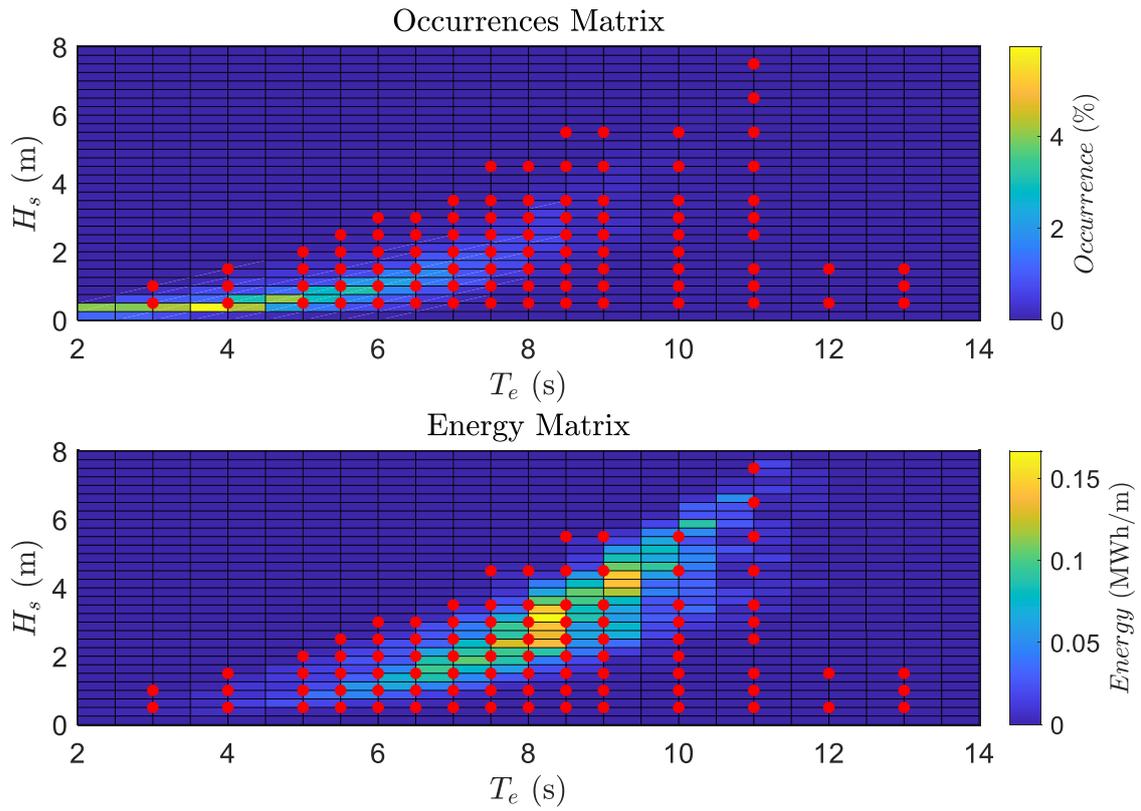


Figura 8 Scatter delle occorrenze ed energia relativa al sito di N\_O Sardegna e in rosso riportate le onde simulate.

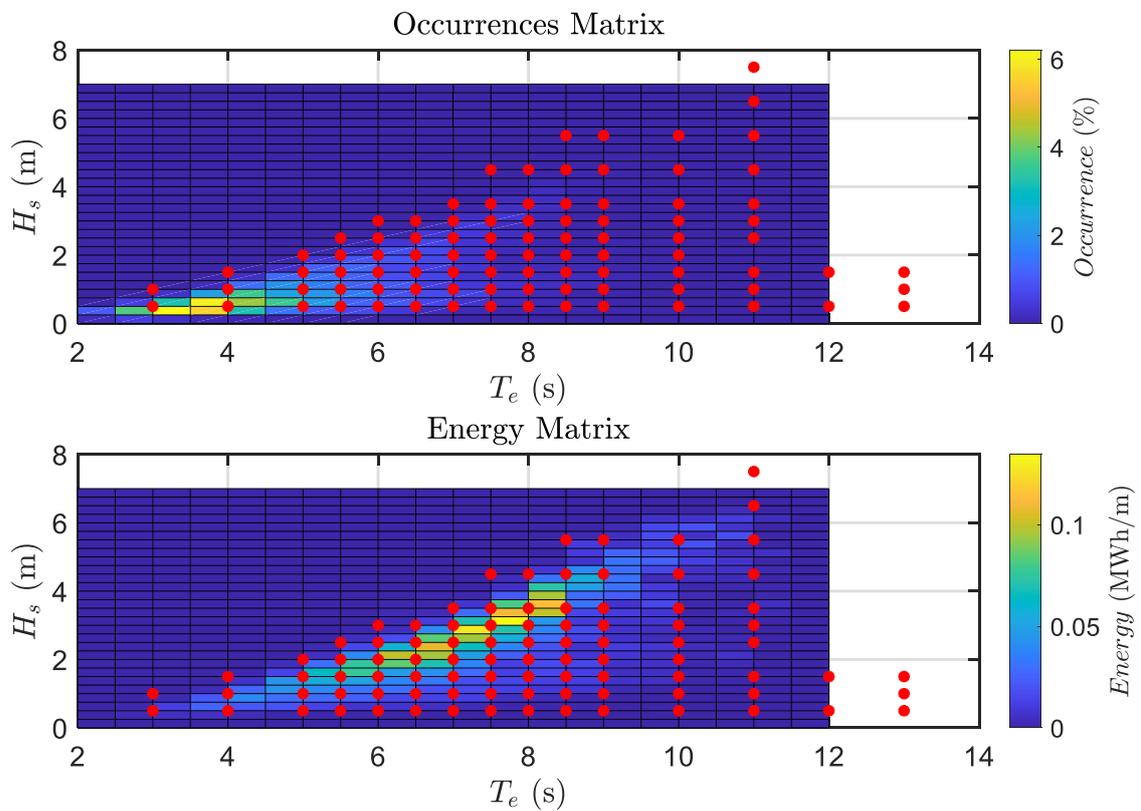


Figura 9 Scatter delle occorrenze ed energia relativa al sito di Pantelleria e in rosso riportate le onde simulate.

## 2.2 Parametrizzazione del dispositivo

Il modello MATLAB precedentemente descritto consente di riprodurre il comportamento di un dispositivo una volta che ne sono note le caratteristiche geometriche, inerziali e del PTO. Tutto questo insieme di informazioni può essere descritto con un set di 13 parametri cruciali che sono qui elencati:

1. Lunghezza dello scafo
2. Larghezza dello scafo
3. Parametro geometrico dello scafo (Tangent Abscissa Ratio)
4. Parametro di altezza dello scafo
5. Parametro di affondamento (Draft Ratio)
6. Parametro di distribuzione peso nelle zavorre (BFR)
7. Massa del pendolo
8. Forma del pendolo
9. Lunghezza del pendolo
10. Numero di Pendoli
11. Posizione del pendolo
12. ID PTO
13. Rapporto di trasmissione

I parametri rappresentati in **BLU** sono relativi allo scafo, quelli in **NERO** al pendolo e quelli in **VERDE** al PTO. A causa della complessità del fenomeno che si vuole riprodurre, è difficile prevedere gli effetti che ciascun parametro avrà sul risultato finale, soprattutto in virtù della mutua influenza che tra essi sussiste. Ad esempio, la forma curva dello scafo viene calcolata in funzione della lunghezza. Per cui cambiando la lunghezza dello scafo si modifica indirettamente anche la forma. Un altro esempio è la massa del pendolo: una massa molto elevata è caratterizzata da una grande inerzia ed è necessaria molta forza per spostarlo, uno scafo piccolo potrebbe non catturare abbastanza energia dalle onde e non essere in grado di muovere a sufficienza il pendolo. Con uno scafo grande, invece, si è in grado di captare sufficiente energia dalle onde e un pendolo molto pesante potrebbe risultare vantaggioso, ma con un costo complessivo maggiore.

Per l'ottimizzazione è stato adottato l'algoritmo genetico che porta diversi vantaggi:

- Ottimizzazione di tipo globale
- Consente il calcolo parallelo e una velocizzazione di ottimizzazione
- Consente l'utilizzo di vincoli di ottimizzazione

Tale algoritmo si ispira al concetto di evoluzione e trasmissione dei geni per identificare il miglior set di parametri che minimizza il costo finale dell'energia. L'algoritmo identifica come *geni* i parametri che caratterizzano il dispositivo (lunghezza, larghezza, massa del pendolo...) e li combina per ottenere diversi dispositivi, che vengono chiamati *individui*. Il lavoro dell'algoritmo è quindi quello di testare le performance di ogni individuo e di produrre nuove combinazioni che promuovano i geni migliori. Inizialmente viene testata una *generazione* ovvero un certo numero di individui, in base alle performance di questi individui verrà scelto quali geni trasmettere alla futura generazione, entro un numero di generazioni solitamente esiguo si otterranno solo ottimi individui caratterizzati da eccellenti geni che garantiscono prestazioni ottimali. Riassumendo, attraverso l'uso dell'algoritmo genetico si è in grado di testare diverse combinazioni dei parametri di progetto, al fine di determinare la particolare combinazione che garantisca un costo dell'energia più basso possibile.

Di seguito sono descritti i parametri coinvolti nel meccanismo di ottimizzazione tramite algoritmo genetico.

### 2.2.1 Scafo

#### Lunghezza Scafo

La dimensione prevalente del dispositivo è quella lungo l'asse X, ovvero lungo la direzione di avanzamento dell'onda. Sebbene la direzione dell'onda sia variabile nel tempo, l'ormeggio flessibile, precedentemente descritto, garantisce che lo scafo sia in grado di muoversi e di essere sempre allineato con l'onda incidente. Per semplicità di calcoli, da qui in avanti si farà anche riferimento a R, ovvero la semilunghezza del dispositivo, calcolabile banalmente come  $R = \frac{L}{2}$ .

#### Larghezza dello scafo

La dimensione dello scafo parallela al fronte d'onda, ovvero ortogonale alla direzione di avanzamento. Una maggiore larghezza del dispositivo comporta maggiore stabilità a rollio e maggiore quantità di energia raccolta dalle onde. Tuttavia, avere uno scafo più largo comporta anche maggior quantità di materiale e pertanto maggiori costi. Un'apposita subroutine presente nel codice scarta a priori gli scafi troppo sottili, che rischierebbero di ribaltarsi.

#### Altezza dello scafo

Tale parametro, indicato in figura come H, è la distanza tra la parete superiore e il fondo della chiglia. Invece che generare direttamente questa grandezza, nel codice viene utilizzato un fattore di proporzione tra la lunghezza e l'altezza: l'algoritmo è infatti in grado di variare il valore di  $k = \frac{H}{R}$ . In questo modo si evita di avere scafi sproporzionati e si è in grado di variare la geometria, invece che la grandezza assoluta.

#### Fattore di forma

Questo valore modifica il punto in cui le due circonferenze si incontrano, in questo modo si va a variare la forma dello scafo. Il parametro che il codice è in grado di modificare è  $h = \frac{X_A}{R}$ , dove  $X_A$  identifica la posizione sull'asse delle X del centro della circonferenza piccola. Al fine di dare un'idea più chiara del ruolo di questo e del precedente parametro, nelle seguenti immagine vengono mostrati alcuni esempi di scafi con le stesse caratteristiche di base, al variare del solo  $h$  e  $k$ .

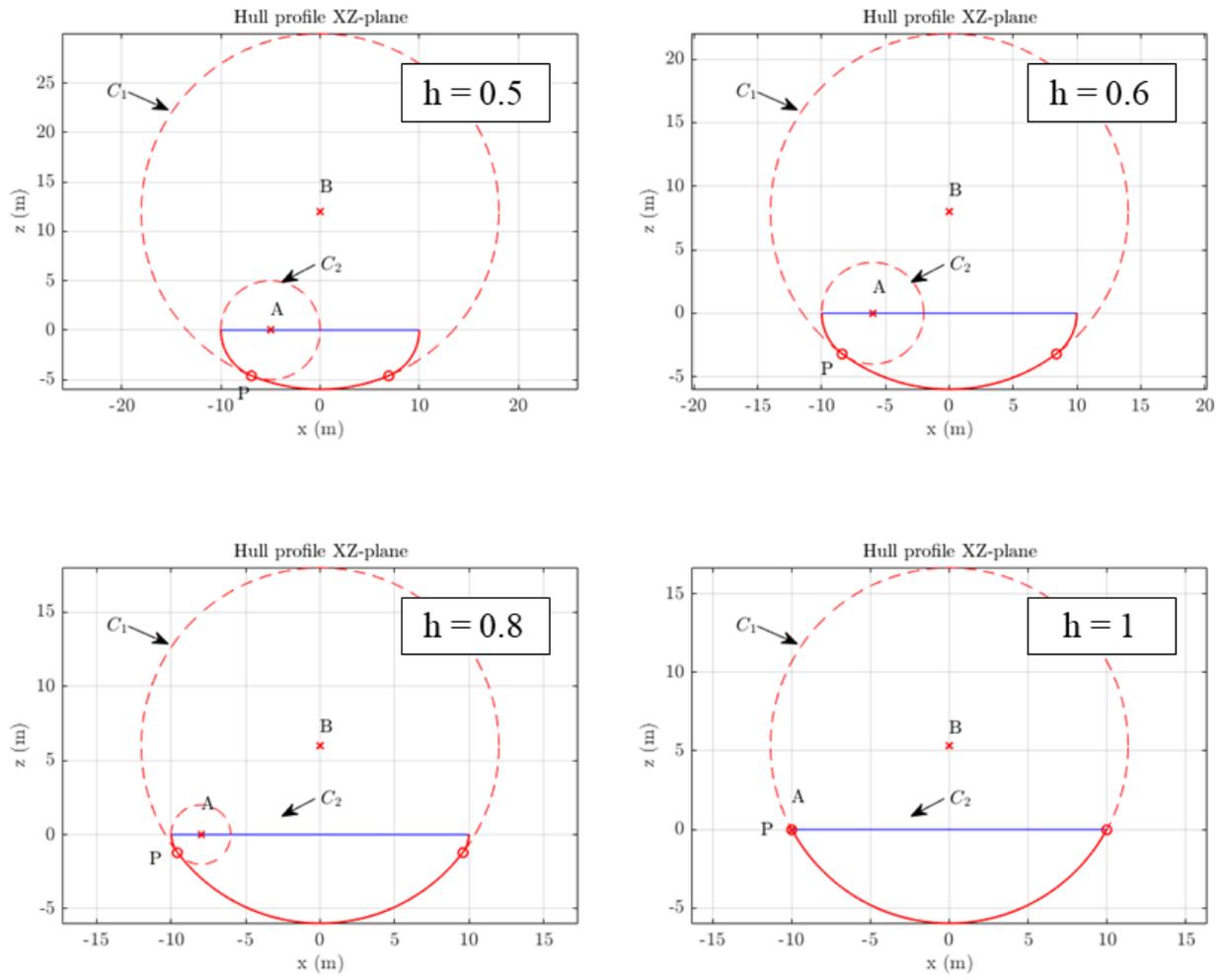


Figura 10 variazione della geometria dello scafo in funzione del parametro  $h$

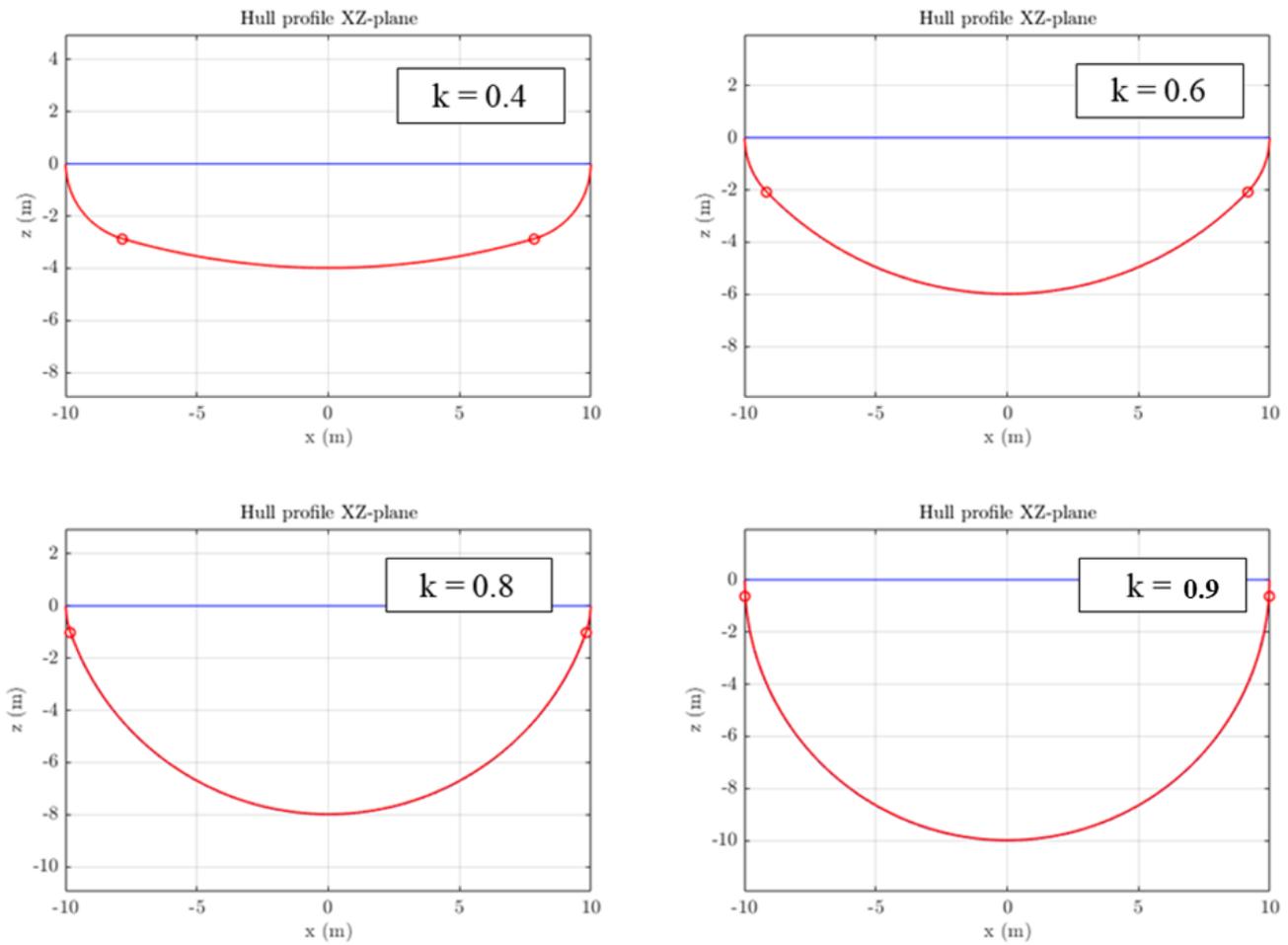


Figura 11 variazione della geometria dello scafo in funzione del parametro  $k$ .

Noti questi quattro parametri dello scafo, è possibile ricavare matematicamente tutti gli altri valori attraverso le seguenti formule

$$R_1 = R - X_A = R(1 - h)$$

$$Z_B = R \frac{k^2 + 1 + 2kh - 2h - 2k}{2 - 2h - 2k}$$

$$R_2 = z_B + H = z_B + kR$$

$$\alpha_P = \text{asin}\left(\frac{Z_B}{X_A}\right)$$

La forma della chiglia può quindi essere descritta dalla seguente funzione:

$$z(x) = \begin{cases} z_A - \sqrt{R_1^2 - (x - x_A)^2}, & \text{per } -R < x \leq R_2 \sin(\alpha_p) \\ z_B - \sqrt{R_2^2 - (x - x_B)^2}, & \text{per } -R_2 \sin(\alpha_p) < x \leq 0 \end{cases}$$

**Affondamento**

Questo parametro definisce quanta parte dello scafo è sommersa. Anche questo fattore viene espresso come un fattore adimensionale, in particolare come il rapporto tra la quantità sommersa e l’altezza totale:  $j = \frac{Draft}{H}$

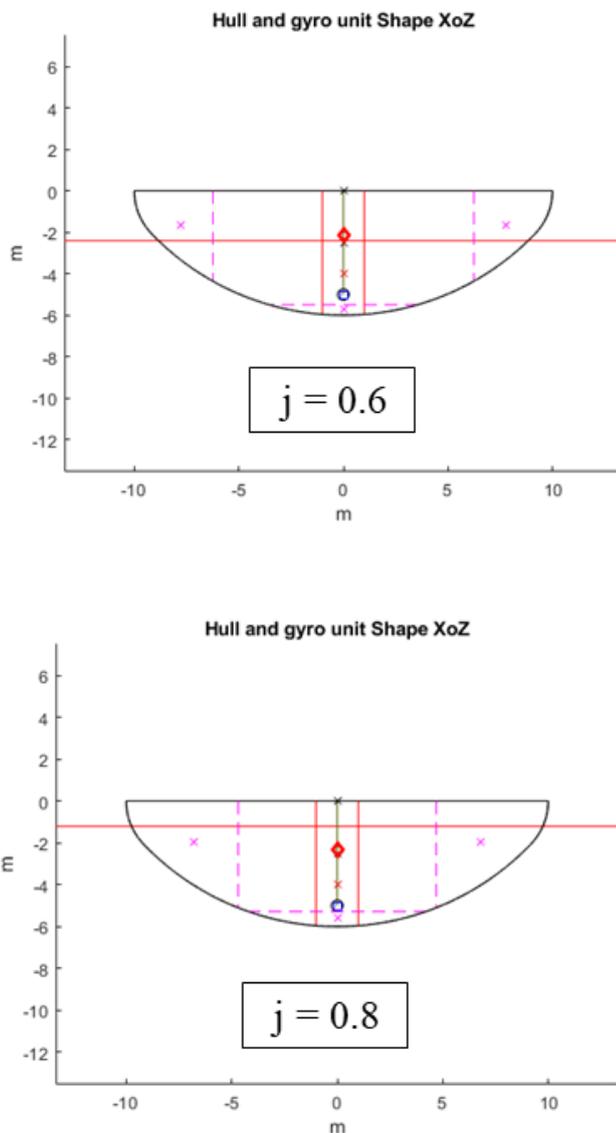


Figura 12 variazione della posizione di galleggiamento dello scafo in funzione del parametro j, la linea rossa orizzontale indica il livello del mare.

## Distribuzione zavorre

Delle zavorre sono necessarie per garantire un peso sufficiente al dispositivo. All'interno dello scafo sono presenti tre zavorre: una a poppa, una a prua e una sul fondo del dispositivo. La posizione e la distribuzione relativa dei pesi delle zavorre influenzano le proprietà inerziali del dispositivo come il momento d'inerzia e la posizione del centro di gravità. Il parametro adimensionale selezionato per definire la distribuzione delle zavorre è il BFR (Ballast Filling Ratio) che definisce il rapporto tra la quantità di massa presente nelle zavorre di poppa/prua e quella presente nella zavorra sul fondo. La massa complessiva presente nelle zavorre viene calcolata come la massa necessaria a raggiungere il peso desiderato del dispositivo, tale valore viene a sua volta calcolato a partire dal volume del dispositivo, dalla densità dei materiali e dalle proprietà di galleggiamento desiderate. Nella seguente immagine sono mostrati alcuni dispositivi di uguali caratteristiche al variare dei solo parametri  $j$  e  $BFR$ .

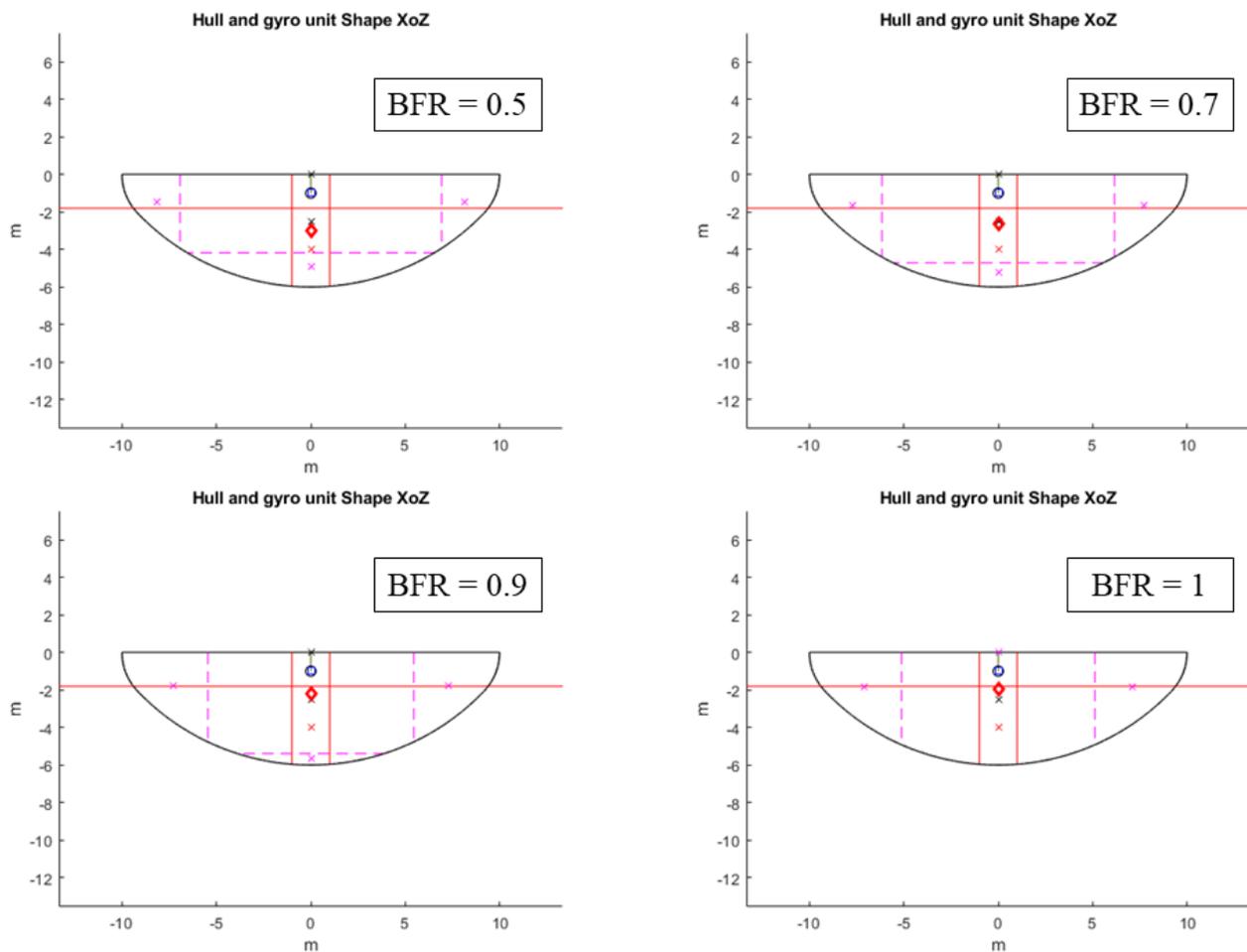


Figura 13 ridistribuzione del peso delle zavorre (viola) al variare del fattore BFR.

## Assunzioni varie

Si assume che lo scafo sia costruito in acciaio da carpenteria navale con densità  $\rho_h$  pari a 7800 kgm<sup>-3</sup> e in base ad esperienze pregresse sui prototipi PeWEC (Pozzi, 2018) si assume che la massa totale dello scafo  $M_h$  (ton) sia uguale in prima approssimazione a 90 volte il volume del galleggiante  $V_h$  (m<sup>3</sup>) del fuori tutto:

$$M_h = 90 * V_h \text{ (ton)}$$

Nota la geometria e massa dello scafo si calcola lo spessore equivalente delle carene dello scafo e di conseguenza si possono calcolare le proprietà inerziali dello scafo.

### 2.2.2 Pendolo

La costruzione del pendolo si basa sulla presenza della UNIT. Le UNIT sono le strutture di supporto del Pendolo e del PTO. Ogni UNIT contiene quindi il Pendolo, il relativo PTO, tutte le attrezzature annesse, tralicci di sostegno e dello spazio vuoto per far passare gli operatori e consentire il montaggio. È stato considerato che ogni UNIT debba avere le seguenti dimensioni:

- Stessa altezza della circonferenza di lavoro del pendolo
- Larghezza del pendolo (in fase di massima oscillazione) +15%
- Profondità del pendolo (asse y) + 2m

Per quanto possibile, ogni parametro del pendolo è stato calcolato parametricamente, ovvero come funzione di altri parametri dello scafo.

Il calcolo delle dimensioni del pendolo avviene secondo la seguente scaletta:

1. Viene individuata l'area disponibile al pendolo nella sezione dello scafo lungo il piano XZ. Questa corrisponde al più grande quadrato che può essere inscritto nella sezione dello scafo (vedere il quadrato rosso nella figura seguente).

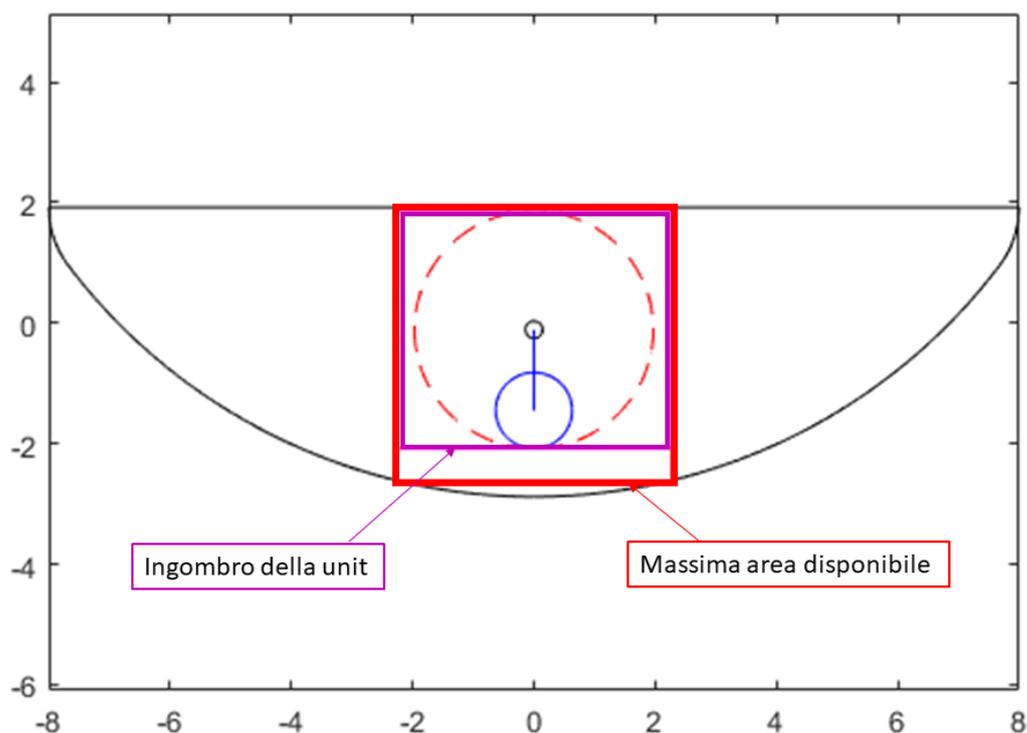


Figura 14 sezione dello scafo in cui sono mostrati gli elementi costruttivi chiave.

2. Viene individuato il massimo spazio disponibile al pendolo nella la sezione dello scafo lungo il piano XY. Lo spazio disponibile viene calcolato dividendo la lunghezza dello scafo per il numero di pendoli imposto dal genetico. Viene qui usato **il primo parametro relativo al pendolo: il numero di pendoli  $n_p$** .

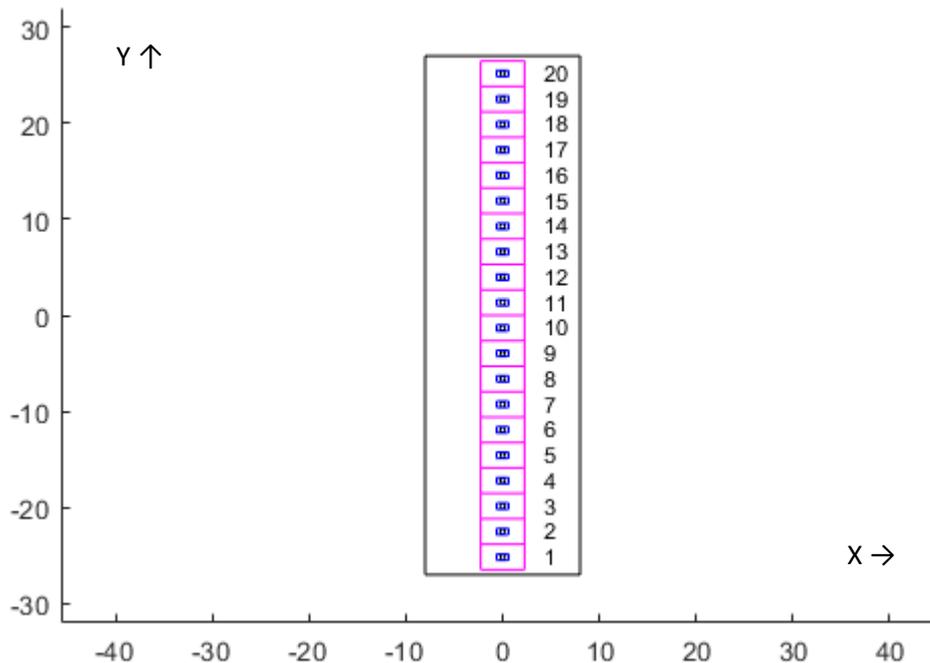


Figura 15 Nella figura di sopra sono già disegnati i pendoli (in blu) e lo spazio occupato dalle UNIT (in magenta).

3. Per calcolare la massa del pendolo si parte dalla massima massa che può essere inserita nello scafo per garantirne il galleggiamento rispettando il fattore di draft richiesto dal genetico, la massa del singolo pendolo viene quindi calcolata come

$$M_{pendolo} = \beta_U \frac{M_{tot} - M_h}{n_p}$$

Dove  $M_{tot}$  è la massa totale del dispositivo,  $M_h$  è la massa dello scafo,  $\beta_U$  è il fattore di massa. Di conseguenza la massa della zavorra è il complementare di  $\beta_U$

4. **Il fattore di massa  $\beta_U$  è il secondo parametro relativo al pendolo governato dal genetico** che varia da 5% a 95% e serve per calcolare la massa del pendolo come frazione della massima massa che può essere inserita nel pendolo.

Nota la densità dell'acciaio, si calcola il volume corrispondente alla massa desiderata, se la somma dei volumi di tutti i pendoli può essere inserita nello scafo allora si procede, altrimenti lo scafo selezionato viene scartato.

5. **Il terzo parametro relativo al pendolo è il fattore geometrico  $\sigma_p$ .** Nota la massa del pendolo e il suo volume e la sua densità (si ipotizza acciaio,  $\rho_p = 7800 \text{ kgm}^3$ ), questo parametro decide se avere un pendolo con asta lunga e corto raggio ( $\sigma_p = 10$ ) o con asta corta e raggio lungo ( $\sigma_p = 0$ )
6. A questo punto la massa oscillante del pendolo è definita, rimane da impostare la lunghezza del braccio del pendolo definita dal rapporto geometrico  $\gamma_p$ . Come gli altri parametri anche questo è calcolato parametricamente. Nota la geometria, viene calcolata la massima lunghezza ammissibile per poter rispettare gli altri vincoli. La lunghezza dell'asta viene quindi calcolata come

$$L_{asta} = L_{massimo} \cdot \gamma_p$$

Il fattore di lunghezza asta è il quarto parametro del pendolo governato dal genetico

7. Infine, viene definita la posizione del pendolo. Nota la geometria del pendolo e gli spazi a disposizione nella UNIT, **il quinto parametro definisce la posizione del pendolo  $\lambda_p$**  che può essere spostato da molto in alto a molto in basso, con dieci posizioni possibili.

È da notare che durante l'ottimizzazione la combinazione dei vari parametri possono portare a dispositivi non realizzabili. A tal fine l'algoritmo riconosce le varie incongruità geometriche o di massa e scarta i dispositivi, dando di volta in volta un peso alla violazione del vincolo imposto.

### 2.2.3 Power Take off

La conversione dell'energia meccanica oscillante del pendolo viene trasformata in energia elettrica per mezzo di un motore a magneti permanenti sincrono (PMSM) connesso ad ogni pendolo per mezzo di moltiplicatore meccanico di velocità. Un altro parametro di ottimizzazione è la taglia del PTO identificato dalla variabile  **$PTO_{ID}$**  a cui è associata una velocità e coppia nominale di funzionamento riportati in Tabella 2.

**Tabella 2 Caratteristiche nominali dei PTO in analisi.**

PTO ID	Nominal Speed (rpm)	Nominal Torque (Nm)	Nominal Power (kW)
1	250	2500	65
2	250	5000	131
3	250	7000	183
4	250	10000	262
5	250	14000	367
6	250	20000	524
7	400	2500	105
8	400	5000	209
9	400	7000	293
10	400	10000	419
11	400	14000	586
12	400	20000	838

L'ultimo parametro di sistema è il rapporto di moltiplicazione del moltiplicatore meccanico  $\tau$ .

### 2.2.4 Perdite

Si ipotizza un rendimento del generatore pari a 95% e del moltiplicatore pari a 95%. Inoltre, si considerano dei consumi fissi dovuti all'elettronica pari a 500 W per ogni unità pendolo. Le perdite dei cuscinetti del pendolo sono state trascurate in quanto il pendolo ruota a basse velocità (Pozzi, 2015).

### 2.2.5 Vincoli di simulazione

L'ottimizzazione dei parametri di controllo  $c_{PTO}$  e  $k_{PTO}$  per ogni stato di mare considera anche dei vincoli di simulazione riportati in Tabella 3. Durante l'ottimizzazione quindi la potenza netta viene massimizzata senza superare questi vincoli, che considerano limiti dovuti alla validità delle ipotesi di linearità (vincolo sul beccheggio dello scafo e dell'angolo di oscillazione del pendolo) e limiti tecnologici dovuti alla coppia e velocità nominale del generatore.

**Tabella 3 Vincoli di simulazione**

Variabile limitata	Unità	valore
Beccheggio scafo ( $\delta$ ) rms	(deg)	20
Angolo pendolo ( $\epsilon$ ) rms	(deg)	45
Velocità generatore ( $Vel_{PTO}$ ) max	(rpm)	Velocità max da catalogo
Coppia generatore ( $T_{PTO}$ ) max	(Nm)	Coppia max da catalogo

### 2.3 Costi

È stata definita una funzione di costo per il dispositivo in esame in modo da tener conto del peso di ogni sottosistema durante l'ottimizzazione. La funzione di costo non ha fini quantitativi, in quanto estremamente dipendenti dal cantiere dove viene costruito il dispositivo, lontananza dal punto di installazione e tanti altri fattori che non possono essere considerati in questa fase di progetto. In questa fase, infatti, non sono ancora note le dimensioni e caratteristiche del dispositivo e non è possibile dunque individuare un cantiere navale di riferimento per la costruzione dello scafo e un'officina meccanica per la realizzazione del sistema pendolo. Tutti questi dettagli di funzione di costo fanno parte di progetti più avanzati con TRL maggiore, dove sono disponibili vari preventivi e stime migliori di costo per il sistema in esame.

Questo studio invece è di particolare importanza per capire le tendenze di ottimizzazione e comprendere l'andamento del costo dei componenti in funzione della forma del dispositivo e della produttività. La funzione di costo qui definita considera i 3 sottosistemi: scafo, pendolo e PTO.

Il costo dello scafo  $C_h$  viene considerato in funzione della massa del dispositivo tramite un coefficiente di costo unitario  $c_h = 3500 \text{ Euro/ton}$  (Pozzi, 2015).

$$C_h = 3500m_h \text{ (Euro)}$$

Il costo dell'unità pendolo  $C_p$  viene considerato in funzione della massa dell'unità pendolo (disco del pendolo, struttura di supporto, albero ecc.) tramite un coefficiente di costo unitario  $c_p = 4000 \text{ Euro/ton}$ , valore pesato fra costo di carpenteria ( $3500 \text{ Euro/ton}$ ) del disco pendolo e struttura e costo lavorazione meccanica di precisione ( $7000 \text{ Euro/ton}$ ) per le parti che richiedono maggiore precisione come alberi, sedi cuscinetti ecc. (Pozzi, 2015).

$$C_p = 4000m_p \text{ (Euro)}$$

## 2.4 Strategia di ottimizzazione

L'ottimizzazione è stata effettuata sui due siti di riferimento Pantelleria e Sardegna Nord Ovest. Vengono inoltre definiti due indici tecno-economici per l'ottimizzazione:

- **CoP (Capex over Productivity) (Euro/MWh):** questo indice tecno-economico tiene in considerazione sia la produttività del dispositivo ma anche il suo costo. È una versione semplificata dell'indice LCOE (Levelized Cost of Energy) ampiamente utilizzato in ambito energetico per equiparare le tecnologie. È definito come:

$$CoP = \frac{Capex}{N_y AEP}$$

Dove con AEP (Annual Energy Production) si intende l'energia netta prodotta dal dispositivo nel sito di interesse e con  $N_y$  si intendono gli anni di funzionamento del dispositivo (si ipotizzano 25 anni di funzionamento).

- **RCW (Relative Capture Width) (%):** è un indice tecno-economico che indica l'efficienza con cui il dispositivo trasforma l'energia delle onde in energia elettrica e non dipende dai costi del dispositivo. È definito come:

$$RCW = \frac{AEP}{E_w}$$

Dove con  $E_w$  si indica l'energia del mare disponibile allo scafo, calcolato come la densità di potenza dello stato di mare  $P_w$  ( $\frac{kW}{m}$ ) moltiplicato per le ore in un anno e la larghezza dello scafo.

Con la presenza di due obiettivi tecno-economici da ottimizzare e considerando i due siti di riferimento si parla di ottimizzazione multi-obiettivo. Ottimizzare un obiettivo non porta all'ottimizzazione dell'altro e quindi non si avrà un'unica soluzione ottima, ma una serie di soluzioni ottime.

Il fine dell'ottimizzazione multi-obiettivo è la ricerca di soluzioni ottimali all'interno dello spazio dei parametri liberi del dispositivo (design space).

Per l'analisi dei dispositivi ottimali verrà utilizzato il metodo di Pareto per la determinazione dei dispositivi ottimi.

Gli algoritmi di ottimizzazione genetici sono stati ideati per le ottimizzazioni singolo obiettivo e non multi-obiettivo. È stata ideata una tecnica, detta di scalarizzazione, che permette di trasformare un problema di ottimizzazione multi-obiettivo in una serie di problemi singolo-obiettivo tramite dei pesi da assegnare ai vari indici di prestazione, in questo caso CoP e RCW.

Per mezzo della tecnica della scalarizzazione i due differenti obiettivi sono aggregati in un unico obiettivo tramite l'utilizzo di una coppia di pesi ( $w_1$ ,  $w_2$ ). Con la scelta di differenti pesi è possibile costruire il set ottimale di Pareto (frontiera di Pareto). In Tabella 4 sono riportati i 3 set di pesi adoperati, dove il primo set equivale all'ottimizzare l'indicatore CoP e l'ultimo l'indicatore RCW, mentre il secondo set ottimizza un valore pesato dei due. In Tabella 6 sono riportati i vari range dei parametri di ottimizzazione, scelta in base a successive calibrazioni.

**Tabella 4 set di pesi per l'ottimizzazione.**

Set dei pesi ID	spiegazione	CoP-weight ( $w_1$ )	RCW-weight ( $w_2$ )
(1)	CoP-driven	1	0
(2)	Weight-driven	0.5	0.5
(3)	RCW-driven	0	1

**Tabella 5 Setup dello spazio dei parametri di ottimizzazione.**

Parametro	Simbolo	Unità	Limite inferiore	Limite superiore	Passo
Lunghezza scafo	$L$	m	12	30	1
Larghezza scafo	$W$	m	10	23	1
Fattore forma scafo	$h$	-	0.5	1	0.1
Fattore altezza scafo	$k$	-	0.5	1	0.1
Affondamento	$j$	-	0.65	0.8	0.05
Distribuzione zavorre	BFR		0.1	1	0.1
Fattore massa pendolo	$\beta_U$	-	5%	40%	2.5%
Fattore forma pendolo	$\sigma_P$	-	1	10	1
Fattore lunghezza pendolo	$\gamma_P$	-	0.1	1	0.1
Numero unità pendolo	$n_P$	-	1	6	1
Fattore posizione pendolo	$\lambda_P$	-	1	10	1
PTO ID	$PTO_{ID}$	-	2	12	1
Rapporto riduzione	$\tau$	-	10	30	5

Per quanto riguarda i parametri di ottimizzazione dell'algoritmo è stata adottata una popolazione basata su 150 individui e un numero massimo di iterazioni pari a 200 generazioni.

### 3 Risultati

Qui di seguito vengono riportati i risultati delle ottimizzazioni dividendo in due sezioni relative ai due siti in analisi. Tutti i risultati delle varie ottimizzazioni sono stati accorpate in modo da avere un set di dati molto ampio per l'analisi. È stata quindi condotta un'analisi di Pareto di tutti i dati per entrambi i siti così da individuare i dispositivi ottimali, secondo Pareto, e ottenere una curva di dispositivi ottimi CoP in funzione di RCW, e analizzare così i vari trend techno-economici di interesse per la scelta dello scafo ottimale.

Tutti i discorsi e analisi dei risultati verranno effettuati per il sito di interesse energetico P\_02\_N\_O\_Sardegna e ragionamenti analoghi possono essere condotti per il sito P06\_Pantelleria di cui vengono forniti le figure e tabelle di analisi.

#### 3.1 N\_O Sardegna

In Figura 16 è riportato il fronte di Pareto con i valori di CoP in funzione di RCW per gli scafi ottimali secondo Pareto. È interessante notare come l'ottimizzazione dei due parametri (minimizzazione CoE e massimizzazione RCW) siano in conflitto: lo scafo ottimale dal punto di vista del CoP non è l'ottimo di RCW e viceversa e corrisponde ai valori peggiori. Questo dettaglio è molto rilevante quando bisogna andare a scegliere lo scafo da costruire e progettare, in quanto è da ricordare che la funzione di costo non è dettagliata ma solo qualitativa per studiare i trend di ottimizzazione. Di seguito vengono riportate diverse considerazioni in relazione alle figure presenti in sezione:

- Con riferimento alla Figura 17 si nota che all'interno dello spazio dei parametri imposto, il valore ottimo di CoP è di 609 Euro/MWh corrispondente a un RCW del 5.2%, mentre il valore di RCW ottimo è di 21.3% corrispondente ad un CoP di 1608 Euro/MWh.
- La produttività annua corrispondente al CoP ottimo è pari a 32 MWh/y ed aumenta con l'aumentare dell'RCW
- Anche il costo del dispositivo aumenta con l'aumentare dell'RCW. Aumentano dimensioni scafo, massa dei pendoli e taglia dei PTO.
- Con riferimento alla Figura 18 si nota come la lunghezza dello scafo aumenti con l'RCW. La lunghezza dello scafo è un parametro di progetto fondamentale in quanto influenza la risposta in frequenza del sistema: a parità di altri parametri se aumenta la lunghezza aumenta il periodo di risonanza. Uno scafo ottimo dal punto di vista del CoP è pertanto corto ed andrà ad agire sulle onde più ricorrenti ma meno energetiche, da qui anche il basso valore di RCW. Al contrario per catturare energia delle onde più energetiche lo scafo va a sintonizzarsi con le onde più lunghe aumentando la lunghezza dello scafo.
- L'altezza dello scafo aumenta con la lunghezza perché tutti gli scafi sono con profilo a semicirconferenza, per aumentare le prestazioni idrodinamiche e l'ampiezza della risposta in frequenza.
- La massa totale dei pendoli e la potenza installata dei generatori aumentano con l'aumentare dell'RCW.

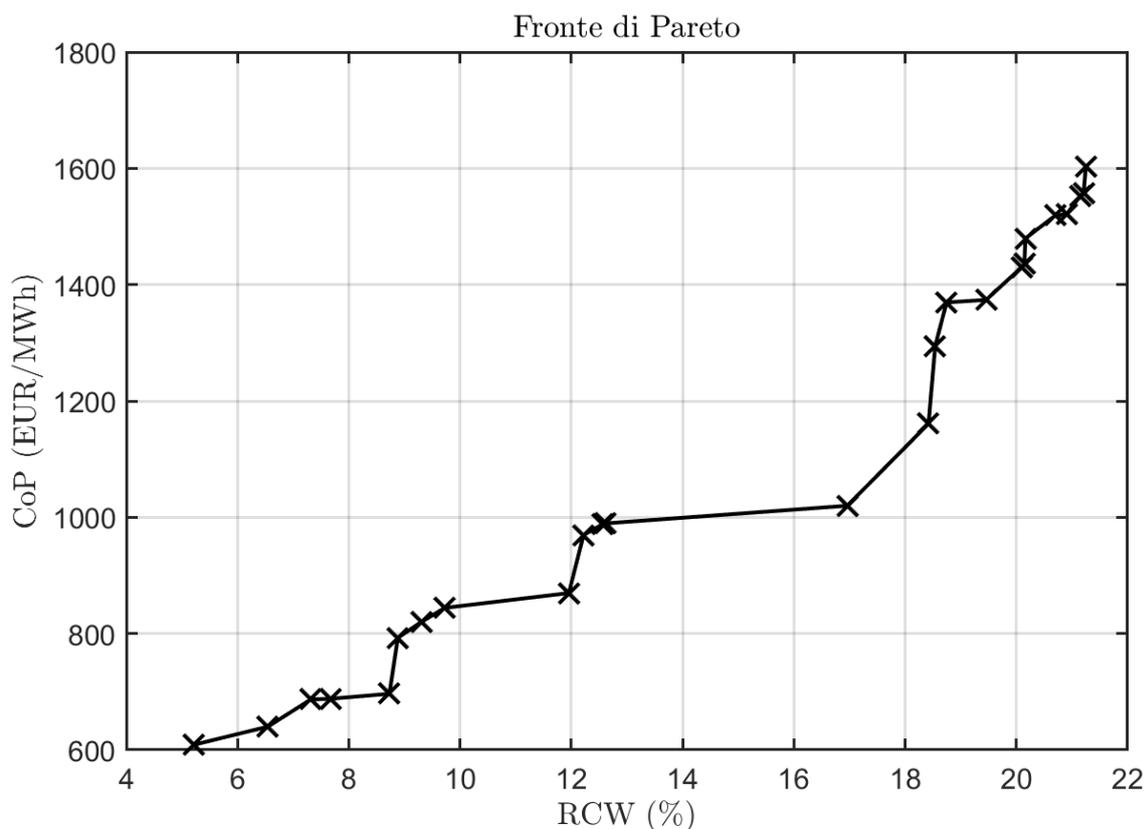


Figura 16 Fronte di Pareto relativo al sito di P02\_N\_O\_Sardegna.

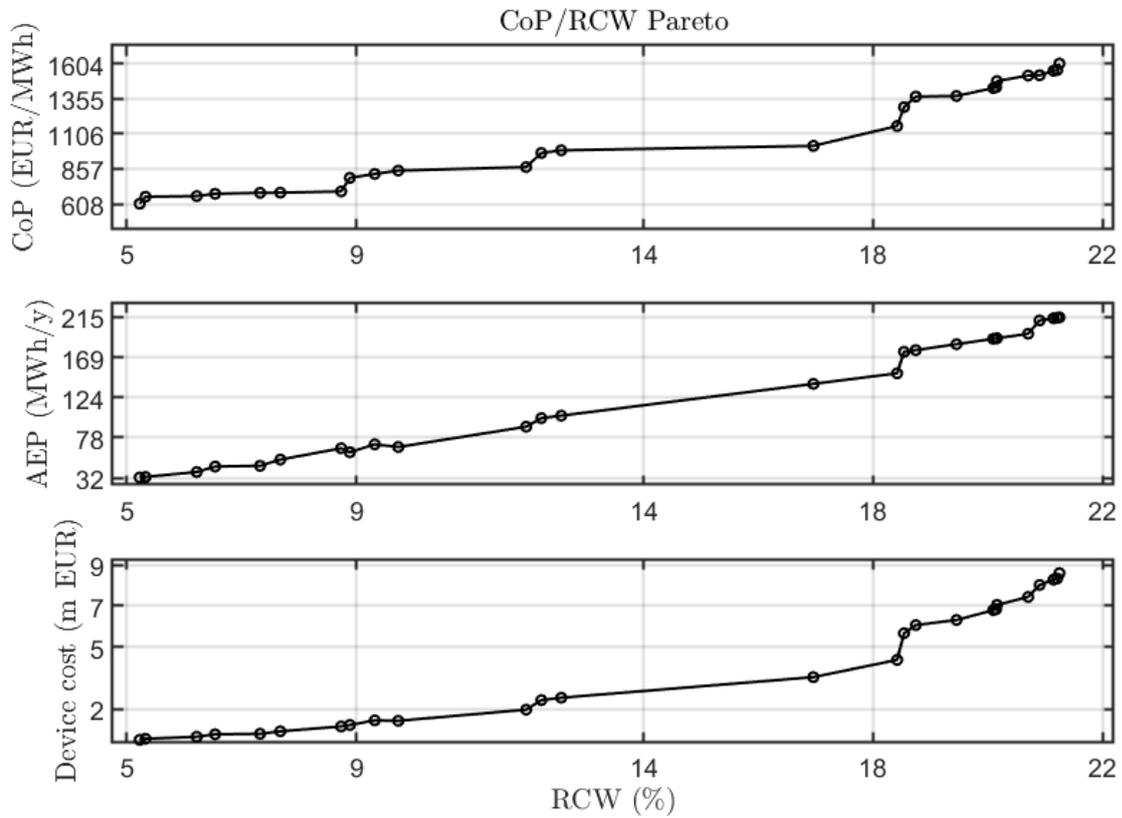


Figura 17 Dispositivi ottimali relativi al sito di P02\_N\_O\_Sardegna. Grafici tecno-economici.

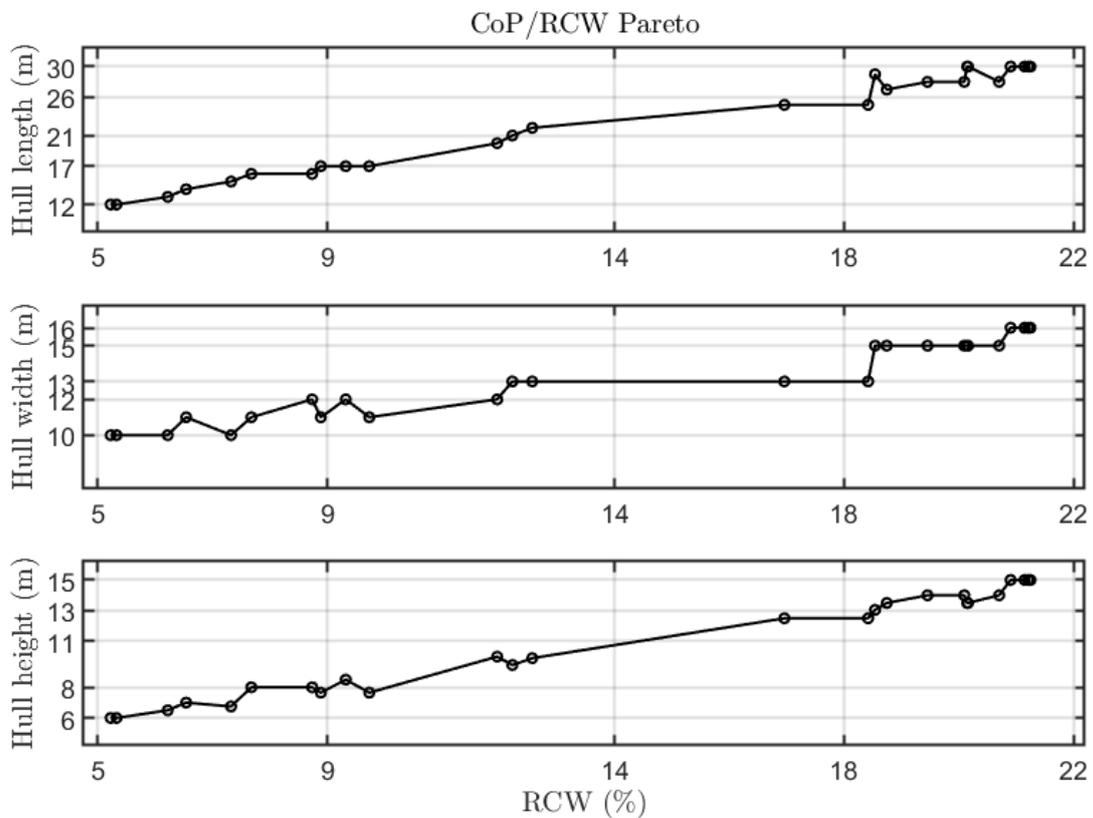


Figura 18 Dispositivi ottimali relativi al sito di P02\_N\_O\_Sardegna. Grafici relativi allo scafo.

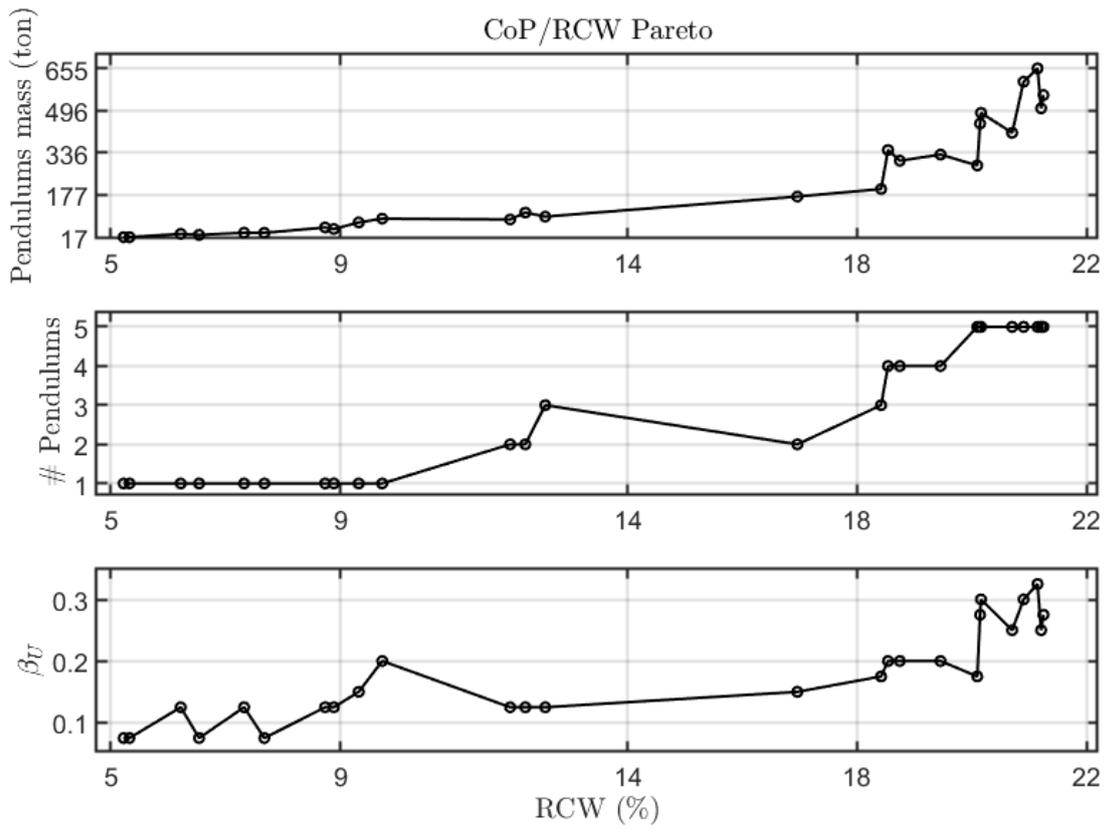


Figura 19 Dispositivi ottimali relativi al sito di P02\_N\_O\_Sardegna. Grafici relativi al pendolo.

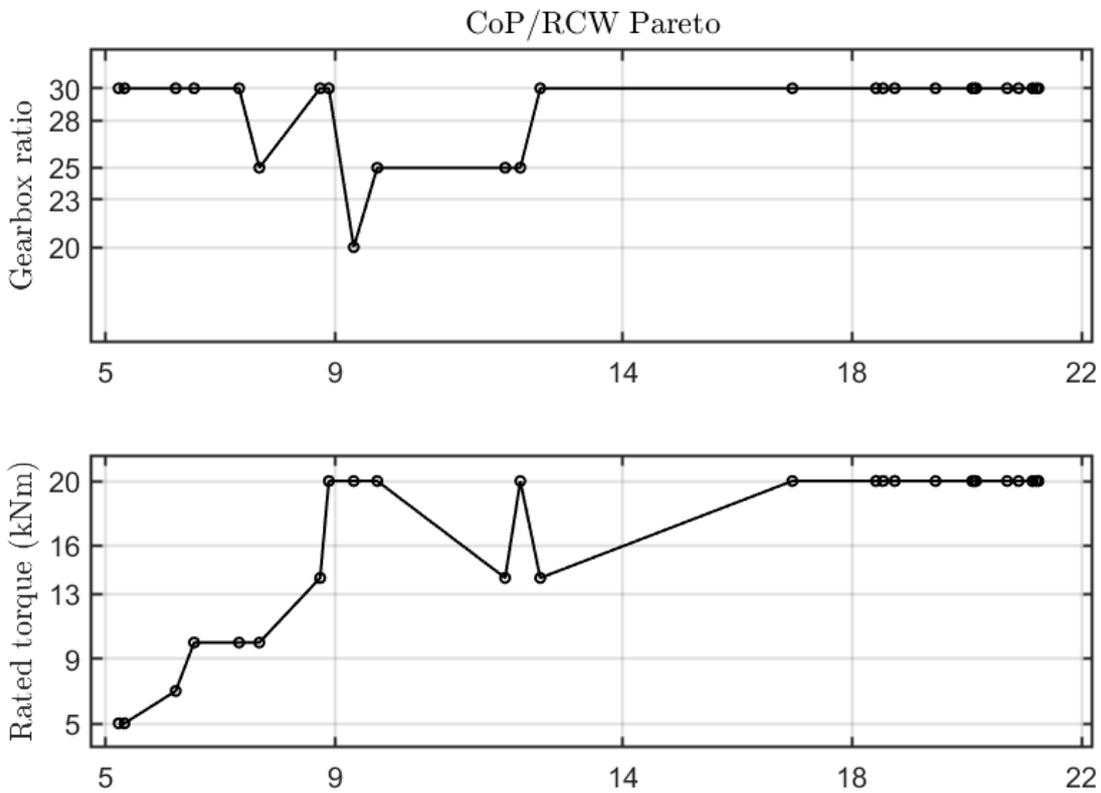


Figura 20 Dispositivi ottimali relativi al sito di P02\_N\_O\_Sardegna. Grafici relativi al PTO (I).

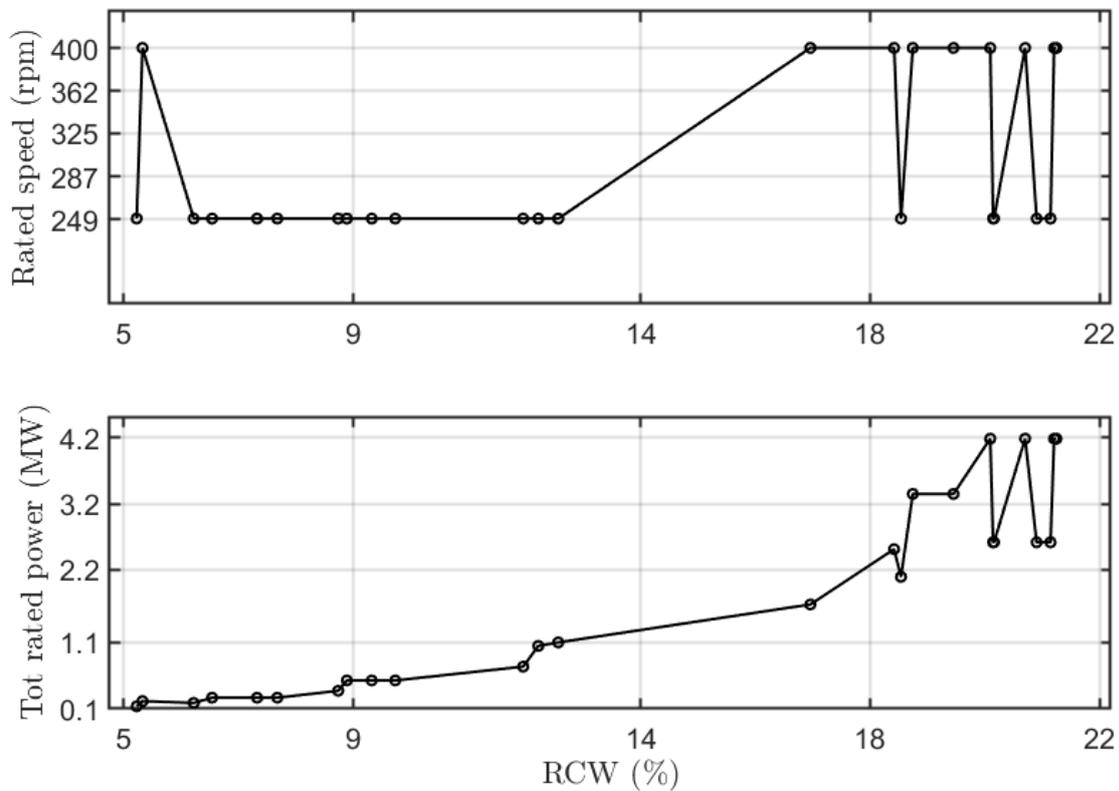
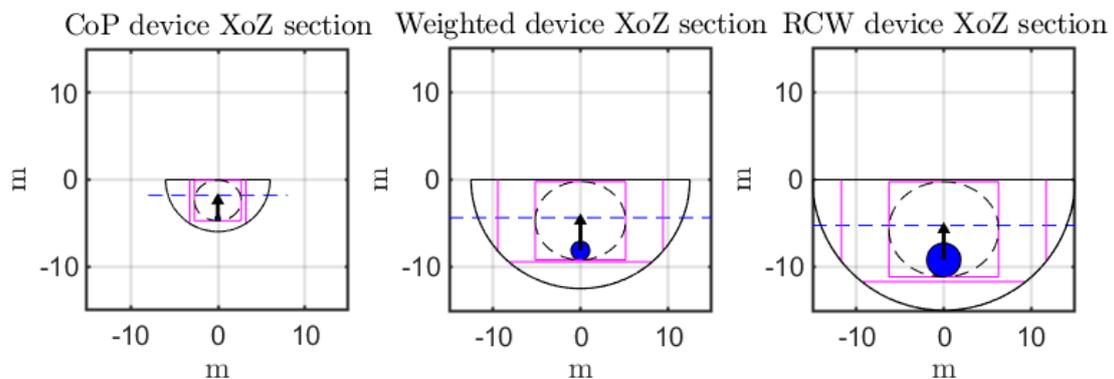


Figura 21 Dispositivi ottimali relativi al sito di P02\_N\_O\_Sardegna. Grafici relativi al PTO (II).

### 3.1.1 Dispositivi di interesse

Qui vengono analizzate le performance di tre dispositivi per evidenziarne le differenze geometriche e di performance. È stato scelto per l'analisi il dispositivo con CoP (CoP device) e RCW (RCW device) ottimale ed uno intermedio (Weighted device) corrispondente al punto in ascissa RCW = 16.9 % (Figura 16).

In Figura 22 sono riportati le viste in profilo e pianta dei vari scafi. Si nota come le proporzioni geometriche siano simili per i tre scafi in analisi, in quanto il profilo a semicirconferenza è il più prestante da un punto di vista idrodinamico per il grado di libertà di beccheggio. Si notano soprattutto le differenze di dimensioni del dispositivo sia in profilo che in pianta, le quali governano anche i costi e la produttività del dispositivo.



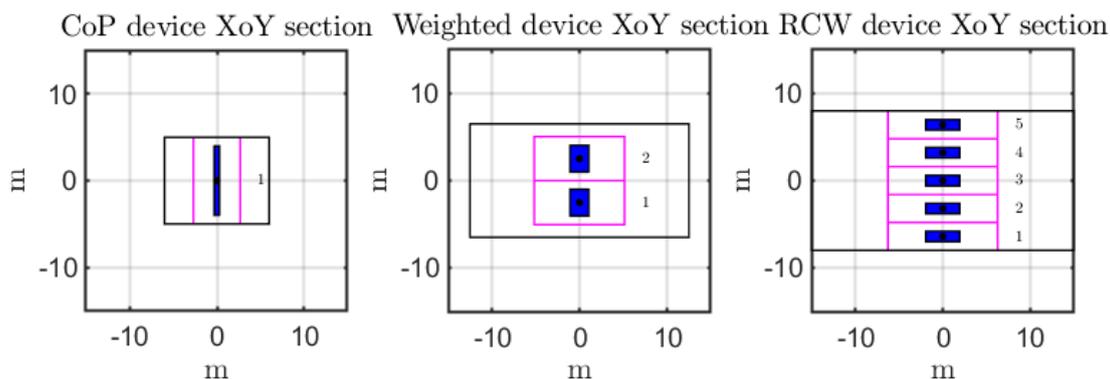


Figura 22 Viste in profilo e pianta dei 3 dispositivi in analisi ottimizzati sul sito P02\_N\_O Alghero. Sono evidenziati in magenta gli ingombri delle unità pendolo e zavorre, in blu il disco del pendolo e con marker triangolo il fulcro del pendolo. Con linea blu tratteggiata è indicata la linea di galleggiamento.

In Tabella 6 sono riportati i parametri che identificano i 3 scafi con i rispettivi costi e la massa totale del dispositivo, mentre in Tabella 7 sono riportati gli indici di prestazione dei 3 scafi calcolati per ogni sito in esame.

Tabella 6 Parametri liberi per i 3 dispositivi analizzati.

ID	Device Cost (Mln Euro)	Device Mass (ton)	L (m)	W (m)	H (m)	k	j	BFR	$\beta_U$	$\sigma_P$	$\gamma_P$	$n_P$	$\lambda_P$	PTO <sub>ID</sub>	$\tau$
CoP Device	0.5	361	12	10	0.5	1	0.7	1	0.075	10	1	1	10	2	30
Weighted Device	3.6	1843	25	13	0.7	1	0.65	0.5	0.15	6	0.9	2	10	12	30
RCW Device	8.6	3267	30	16	0.5	1	0.65	0.5	0.275	10	0.9	5	10	12	30

Tabella 7 Prestazioni dei 3 dispositivi ottimizzati sul sito P02\_N\_O Alghero relativi a tutti i siti in analisi.

Site	CoP (Euro/Mwh)			RCW (%)			AEP (MWh)		
	CoP Device	Weighted Device	RCW Device	CoP Device	Weighted Device	RCW Device	CoP Device	Weighted Device	RCW Device
P01 Isola D Elba	2983	6239	11689	7.9	20.5	21.5	6.7	22.7	29.4
P02 N O Sardegna	609	1020	1604	5.2	17.0	21.2	32.9	139.0	214.4
P03 N Baleari	1749	3248	5722	7.0	20.4	22.8	11.5	43.7	60.1
P04 S O Sardegna	861	1452	2293	4.9	15.7	19.6	23.3	97.6	149.9
P05 N O Sicilia	1062	2035	3530	7.3	20.7	23.5	18.9	69.7	97.4
P06 Pantelleria	693	1306	2192	7.0	20.3	23.8	28.9	108.6	156.8
P07 S O Sicilia	1118	2349	4341	8.8	22.9	24.4	17.9	60.4	79.2
P08 S Sicilia	987	2018	3623	8.0	21.4	23.5	20.3	70.3	94.9
P09 Malta	699	1284	2174	7.0	20.6	24.0	28.7	110.4	158.2
P10 O Creta	882	1737	3007	7.0	19.4	22.0	22.7	81.6	114.4

P11 Israele	1637	3146	5767	6.5	18.4	19.8	12.2	45.1	59.6
-------------	------	------	------	-----	------	------	------	------	------

### 3.2 Pantelleria

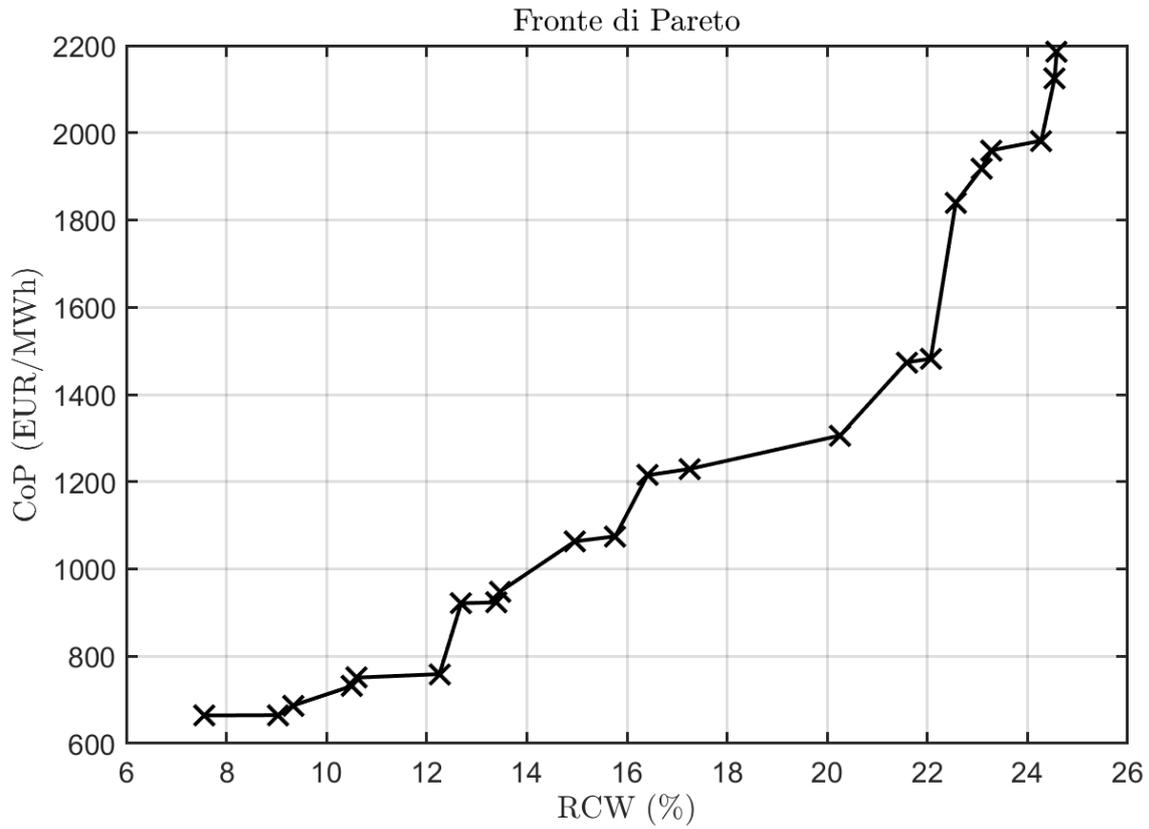


Figura 23 Fronte di Pareto relativo al sito di P06 Pantelleria.

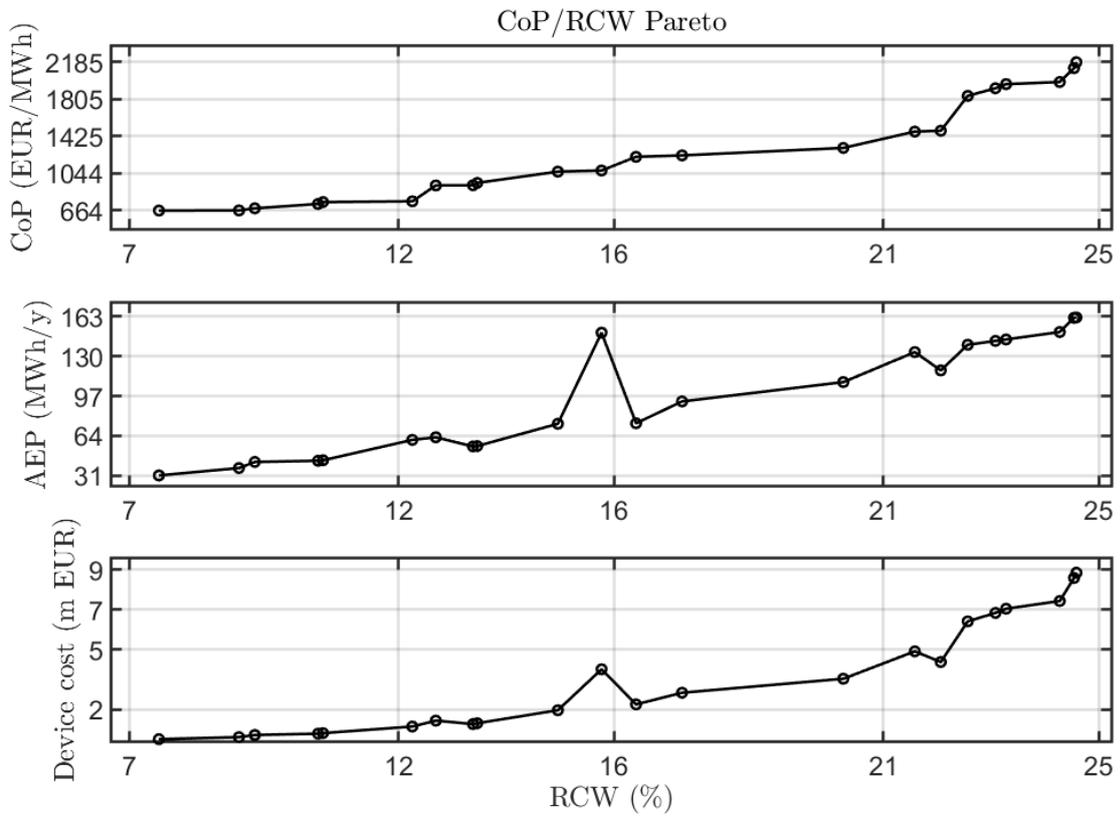


Figura 24 Dispositivi ottimali relativi al sito di P06 Pantelleria. Grafici tecno-economici.

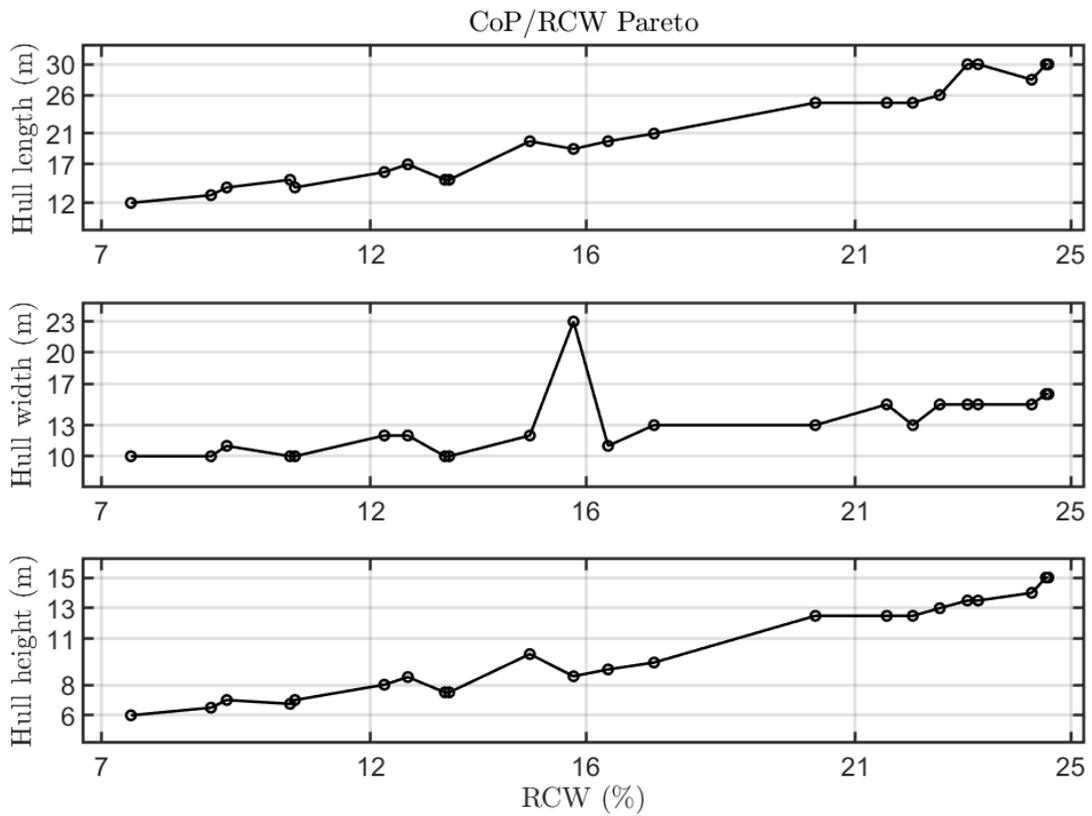


Figura 25 Dispositivi ottimali relativi al sito di P06 Pantelleria. Grafici relativi allo scafo.

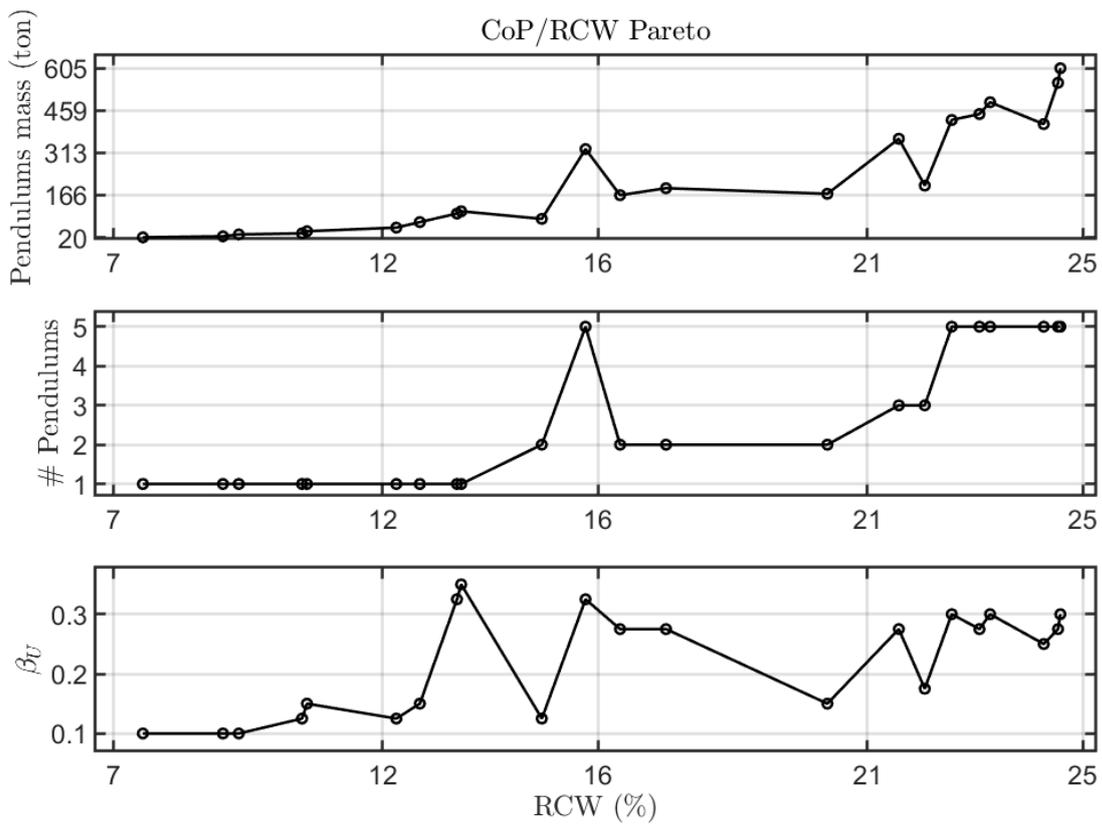


Figura 26 Dispositivi ottimali relativi al sito di P06 Pantelleria. Grafici relativi al pendolo

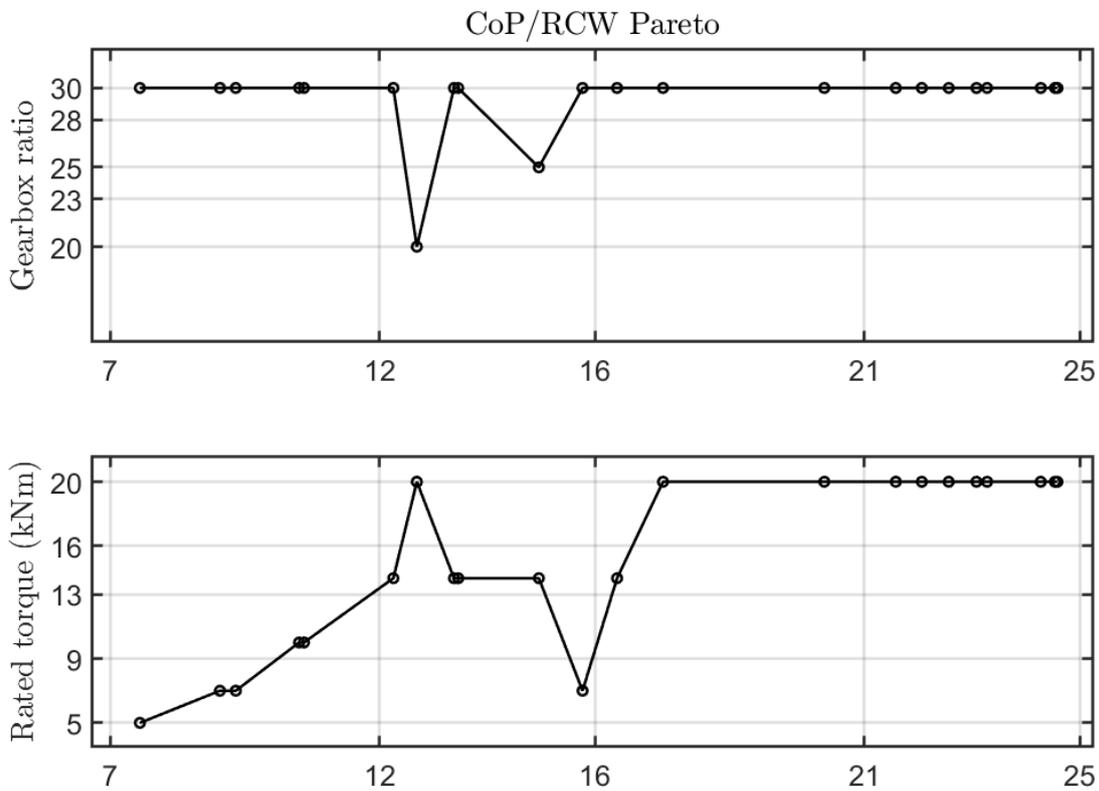


Figura 27 Dispositivi ottimali relativi al sito di P06 Pantelleria. Grafici relativi al PTO (I).

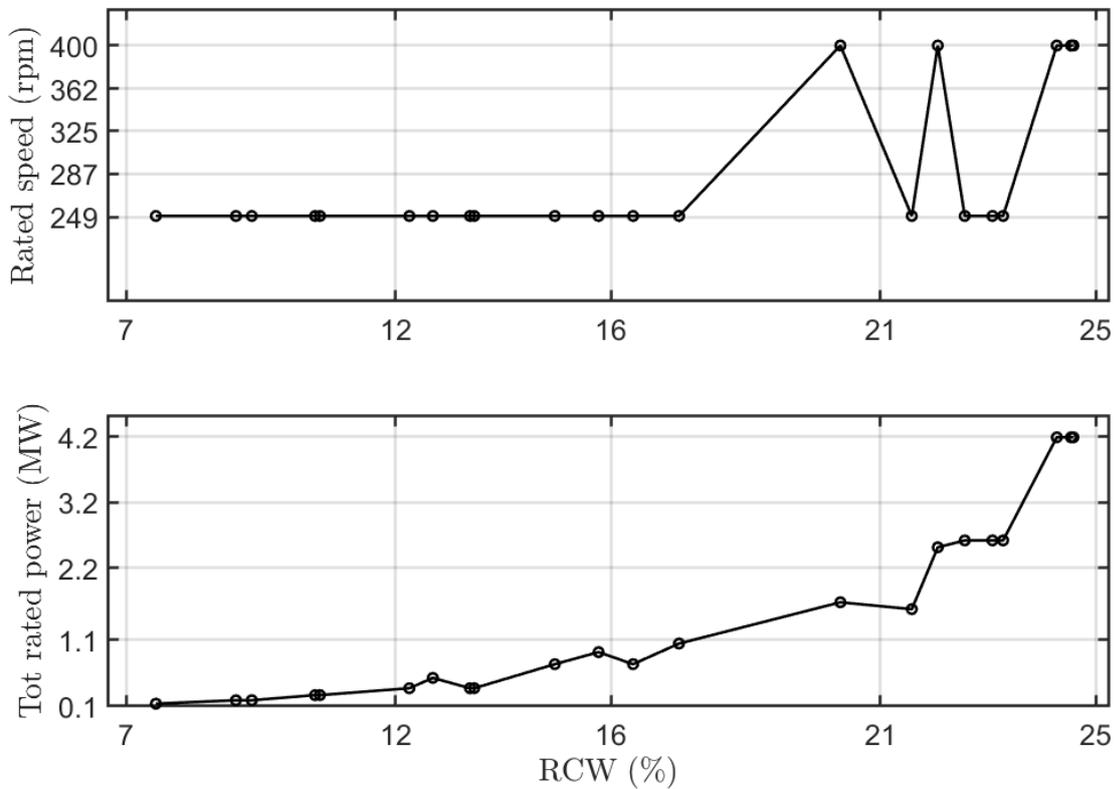
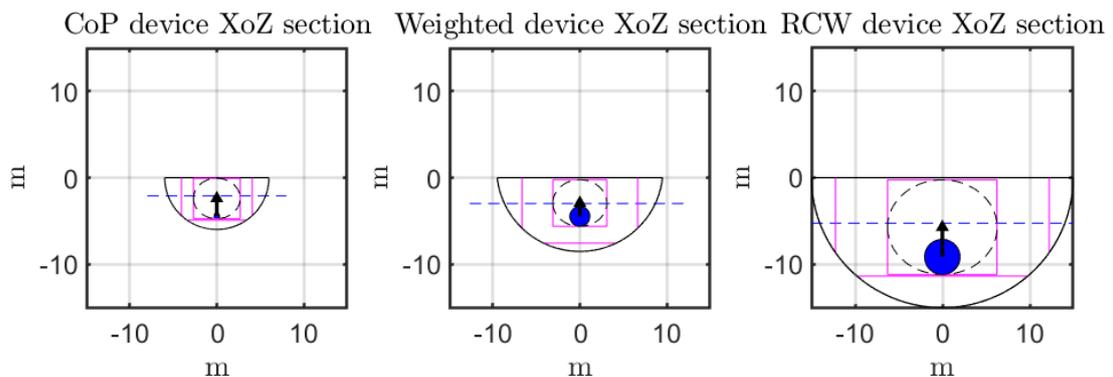
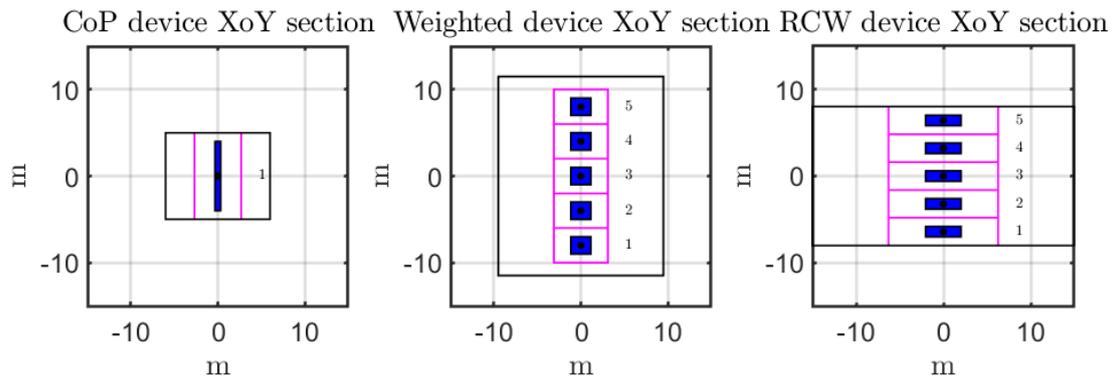


Figura 28 Dispositivi ottimali relativi al sito di P06 Pantelleria. Grafici relativi al PTO (II).

3.2.1 Dispositivi di interesse

Analogamente al caso di studio sul sito P02\_N\_O Sardegna, vengono qui analizzati tre dispositivi: il miglior dispositivo secondo il CoP, il miglior dispositivo secondo l'RCW e un dispositivo mediato fra i due indici tecnico-economici. Sia il dispositivo CoP che RCW sono molto simili come geometria, distribuzione zavorre e unità pendolo e generatore a quelli relativi al sito P02\_N\_O Sardegna. Invece come dispositivo mediato è stato scelto quello con una larghezza pari a 23 m in quanto potenzialmente interessante come caso studio, dato un fronte di assorbimento maggiore e quindi una produttività annua consistente. La forma degli scafi, analogamente alla precedente ottimizzazione, presenta profili semisferici, confermando la bontà delle prestazioni idrodinamiche di questa geometria.





**Figura 29** Viste in profilo e pianta dei 3 dispositivi in analisi ottimizzati sul sito P06 Pantelleria. Sono evidenziati in magenta gli ingombri delle unità pendolo e zavorre, in blu il disco del pendolo e con marker triangolo il fulcro del pendolo. Con linea blu tratteggiata è indicata la linea di galleggiamento.

In Tabella 8 vengono riportati i valori dei parametri dei tre dispositivi scelti e in Tabella 9 sono riportate le relative prestazioni per ogni sito in analisi.

**Tabella 8** Parametri liberi per i 3 dispositivi analizzati.

ID	Device Cost (Mln Euro)	Device Mass (ton)	L (m)	W (m)	H	K	J	BFR	$\beta_U$	$\sigma_P$	$\gamma_P$	$n_P$	$\lambda_P$	$PTO_{ID}$	$\tau$
CoP Device	0.5	327	12	10	1	1	0.65	0.7	0.1	10	1	1	10	2	30
Weighted Device	4	1637	19	23	0.7	0.9	0.65	0.8	0.325	7	0.7	5	10	3	30
RCW Device	8.7	3267	30	16	0.5	1	0.65	0.4	0.3	10	0.9	5	10	12	30

**Tabella 9** Prestazioni dei 3 dispositivi ottimizzati sul sito P06 Pantelleria relativi a tutti i siti in analisi.

Site	CoP (Euro/MWh)			RCW (%)			AEP (MWh)		
	CoP Device	Weighted Device	RCW Device	CoP Device	Weighted Device	RCW Device	CoP Device	Weighted Device	RCW Device
P01 Isola D Elba	2983	6239	11689	7.9	20.5	21.5	6.7	22.7	29.4
P02 N O Sardegna	609	1020	1604	5.2	17.0	21.2	32.9	139.0	214.4
P03 N Baleari	1749	3248	5722	7.0	20.4	22.8	11.5	43.7	60.1
P04 S O Sardegna	861	1452	2293	4.9	15.7	19.6	23.3	97.6	149.9
P05 N O Sicilia	1062	2035	3530	7.3	20.7	23.5	18.9	69.7	97.4
P06 Pantelleria	693	1306	2192	7.0	20.3	23.8	28.9	108.6	156.8
P07 S O Sicilia	1118	2349	4341	8.8	22.9	24.4	17.9	60.4	79.2
P08 S Sicilia	987	2018	3623	8.0	21.4	23.5	20.3	70.3	94.9
P09 Malta	699	1284	2174	7.0	20.6	24.0	28.7	110.4	158.2
P10 O Creta	882	1737	3007	7.0	19.4	22.0	22.7	81.6	114.4
P11 Israele	1637	3146	5767	6.5	18.4	19.8	12.2	45.1	59.6

## 4 Conclusioni

Questo report descrive i risultati legati all'ottimizzazione del dispositivo PeWEC su due siti scelti, la costa Nord-Ovest della Sardegna e Pantelleria, considerando due parametri tecno-economici: CoP (Capex over Productivity, ossia costi fissi del dispositivo diviso la produttività annua) e RCW (Relative Capture Width, ossia efficienza di trasformazione dell'energia delle onde).

Un risultato importante è l'ottimizzazione conflittuale dei due indici CoP e RCW in quanto relazionati da una proporzionalità inversa. Il fattore che influenza questa conflittualità è il costo del dispositivo: quando si ottimizza il CoP l'algoritmo trova dispositivi a basso costo che garantiscano una discreta produttività, mentre quando si ottimizza l'RCW non si fa riferimento al costo per incrementare l'efficienza del sistema.

Il problema di affidarsi unicamente all'indicatore CoP però è appunto l'incertezza sulla funzione di costo in questa fase iniziale di progetto come discusso in sezione 2.3.

Sono stati analizzati le tendenze di ottimizzazione:

- Gli scafi ottimi presentano tutti un profilo a semicirconferenza, forma performante dal punto di vista idrodinamico
- Ottimizzare il CoP porta a dispositivi piccoli, poco costosi e dalla contenuta produttività e basso RCW.
- Ottimizzare l'RCW porta a dispositivi grandi, costosi, dalla consistente produttività e alti valori di CoP (l'ottimizzazione non tiene conto dei costi)

Per lo studio successivo (Linea attività 1.21) con modelli più affidabili che considerano la dinamica non-lineare del dispositivo sono stati scelti tre scafi ottimali per il sito in Sardegna e Pantelleria, uno scafo ottimo secondo l'indice CoP, uno secondo l'indice RCW e l'altro mediato fra i due indici.

Successivamente (Linea attività 1.21) verranno condotti degli studi considerando tecnologie di realizzazione innovative sia per lo scafo che per il pendolo. Si valuterà infatti l'impatto di realizzare i due sottosistemi in cemento in modo tale da ridurre notevolmente il costo del dispositivo e quindi l'indice CoP. Le nuove ottimizzazioni verranno quindi confrontate con quelle precedenti per evidenziare i vantaggi dell'adozione dei nuovi materiali di costruzione.

## 5 Bibliografia

Babarit, Delhommeau. «Theoretical and numerical aspects of the open source BEM solver.» In Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference, 2015.

Cummins. «The impulse response function and ship motions.» Technical Report 1661, Department of the Navy,, 1962.

Ogilvie. «Recent progress toward the understanding and the prediction of ship motion.» In Proceedings of the 5th Symposium on Naval Hydrodynamics, 1964.

Pisacane, Giovanna, Gianmaria Sannino, e Adriana Carillo. «Marine Energy Exploitation in the MediterraneanRegion: Steps Forward and Challenges.» Eenergy Research, 2018.

Pozzi N., “Numerical Modeling and Experimental Testing of a Pendulum Wave Energy Converter (PeWEC)”, Tesi di dottorato, Politecnico di Torino, 2018.

G. Bracco, E. Giorcelli, G. Mattiazzo, N. Pozzi, E. Giovannini, A. Fontanella, “Metodologia progettuale del sistema di conversione “passivo””, Report RdS/PAR2014/226, 2014.

G. Bracco, E. Giorcelli, G. Mattiazzo, N. Pozzi, E. Giovannini, A. Fontanella, G. Sannino, “Progettazione e costruzione del sistema di conversione in scala intermedia”, Report RdS/PAR2014/ 22, 2014.

G. Mattiazzo,E. Giorcelli, G. Bracco,N. Pozzi, E. Giovannini, A. Fontanella, G. Sannino, “Parte A: Attività sperimentali sul dispositivo PEWEC in scala 1:12”, Report RdS/PAR2014/228, 2014.

## 6 Appendice

Il centro ricerche Marine Offshore Renewable Energy (MORELab) nasce presso il Politecnico di Torino e rappresenta il frutto dell'esperienza maturata da parte del Politecnico nel campo dell'energia marina.

Il gruppo, altamente interdisciplinare, conta ad oggi più di 50 persone tra ricercatori a tempo indeterminato e determinato, dottorandi, e assegnisti che costituiscono il motore propulsivo del Centro.

Le principali attività del Centro riguardano lo sviluppo di metodologie per l'analisi, lo sviluppo e il test di tecnologie per la produzione di energia dal mare con attività relative a Progettazione, Modellazione Numerica, Sviluppo di Sistemi di Controllo, Test in Vasca Prova e in Mare Aperto.

A oggi, i focus particolari riguardano:

- Wave Energy
- Off-shore Wind Energy
- Piattaforme energetiche multifunzionali
- Energy Storage

Le competenze del MORE riguardano:

- analisi della risorsa marina/eolica
- applicazione di competenze relative allo studio di idrodinamica di corpi galleggianti soggetti a moto ondoso e correnti (con tecniche di modellazione lineare e non, integrate ad analisi CFD)
- sviluppo e progettazione dei sistemi elettromeccanici di conversione
- applicazione di metodologie per il controllo dei sistemi (PID, Controllo Ottimo, LQR, Fuzzy, MPPT, MPC, Data driven etc.)
- progettazione e ottimizzazione di sistemi di ormeggi
- interfacciamento del dispositivo ai sistemi di distribuzione di energia elettrica
- valutazione di accumuli per la gestione delle smart grid
- analisi di array di sistemi
- integrazione di RES tradizionali
- sviluppo di scenari energetici rivolto ad isole minori
- business model di comunità energetiche

La complessità endemica di queste tematiche necessita il coinvolgimento di numerose figure professionali fortemente interconnesse e supportate dalle tecnologie più performanti. A questo proposito, il Centro porta al suo interno competenze di modellazione numerica avanzata di sistemi energetici marini, la cui capacità predittiva e affidabilità viene moltiplicata dall'utilizzo delle tecnologie di HPC.

All'attività di modellazione numerica, il Centro affianca anche un'intensa attività sperimentale, frutto di un'esperienza quindicennale ad ampio spettro, che spazia dalle attività di testing su banchi prova basati sulla tecnologia Hardware in the Loop alle attività sperimentali in vasche prova nazionali e internazionali.

L'ecosistema del Centro, già collaudato nell'ambito dei Gruppi di Ricerca che lo animano, si caratterizza per una spiccata propensione alla collaborazione a più livelli, in particolar modo con gli stakeholders industriali del panorama energetico e con numerosi partners nazionali e internazionali, coinvolti anche nelle facilities a disposizione del Centro.

Selezione di Pubblicazioni:

- ✓ Di Muro, A., Sirigu, S.A., Giorgi, G., Gerboni, R., Bracco, G., Carpignano, A., Mattiazzo, G., Life Cycle Assessment for the ISWEC Wave Energy Device, (2021) Mechanisms and Machine Science, 91, pp. 515-523.

- ✓ Giorgi, G., Gomes, R.P.F., Henriques, J.C.C., Gato, L.M.C., Bracco, G., Mattiazzo, G., Detecting parametric resonance in a floating oscillating water column device for wave energy conversion: Numerical simulations and validation with physical model tests, (2020) *Applied Energy*, 276.
- ✓ Dafnakis, P., Bhalla, A.P.S., Sirigu, S.A., Bonfanti, M., Bracco, G., Mattiazzo, G., Comparison of wave-structure interaction dynamics of a submerged cylindrical point absorber with three degrees of freedom using potential flow and computational fluid dynamics models, (2020) *Physics of Fluids*, 32 (9).
- ✓ Mattiazzo, G., State of the Art and Perspectives of Wave Energy in the Mediterranean Sea: Backstage of ISWEC, (2019) *Frontiers in Energy Research*.
- ✓ Buscaino, G., Mattiazzo, G., Sannino, G., Papale, E., Bracco, G., Grammatta, R., Carillo, A., Kenny, J.M., De Cristofaro, N., Ceraulo, M., Mazzola, Acoustic impact of a wave energy converter in Mediterranean shallow waters, (2019) *Scientific Reports*, 9 (1).
- ✓ Bracco, G., Giorcelli, E., Mattiazzo, G., ISWEC: A gyroscopic mechanism for wave power exploitation (2011) *Mechanism and Machine Theory*, 46 (10), pp. 1411-1424.