

# Ricerca di Sistema elettrico



## Progettazione preliminare del PeWEC (LA1.4)

Mattiazzo Giuliana, Carapellese Fabio, Sirigu Sergej Antonello  
Paduano Bruno, Bracco Giovanni

Progettazione preliminare del PeWEC (LA1.4)

Mattiazzo G., (Politecnico di Torino), Carapellese F. (Politecnico di Torino), Sirigu S.A. (Politecnico di Torino), Paduano B. (Politecnico di Torino), Bracco G. (Politecnico di Torino)

Febbraio 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA  
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione/Digitalizzazione ed evoluzione delle reti*

Progetto: *Energia elettrica dal mare*

Linea di attività: 1.4

Responsabile del Progetto: Gianmaria, Sannino, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Giuliana, Mattiazzo, ENEA

Mese inizio previsto: 1

Mese inizio effettivo: 1

Mese fine previsto: 10

Mese fine effettivo: 10

## Indice

1	RISULTATI ATTESI .....	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	4
3	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE .....	5
4	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	6
5	BIBLIOGRAFIA.....	17

## 1 Risultati attesi

L'attività ha previsto la definizione e l'ottimizzazione dei sottosistemi principali del dispositivo PeWEC per individuare i parametri del prototipo da realizzare. Questi includono la configurazione ottimale dello scafo, l'unità di conversione del pendolo, il dimensionamento del generatore elettrico, l'elettronica di potenza e il sistema di ormeggio. Ogni elemento contribuisce in modo unico al funzionamento complessivo del dispositivo, richiedendo una progettazione dettagliata e un'ottimizzazione accurata per massimizzare l'efficienza globale.

L'analisi dei carichi che agiscono sui sistemi del dispositivo PeWEC rappresenta una fase cruciale del processo di progettazione. Questo studio mira a comprendere le sollecitazioni meccaniche, idrodinamiche ed elettromagnetiche che influiscono su ciascun sottosistema. La corretta valutazione di tali carichi è fondamentale per garantire la solidità strutturale del dispositivo e la sua affidabilità nell'ambiente marino.

Simultaneamente, viene effettuata un'attenta valutazione delle prestazioni del dispositivo nel sito di installazione. Questa fase coinvolge il calcolo previsionale dell'energia prodotta dal PeWEC, tenendo conto delle specificità del luogo, delle condizioni ambientali e delle caratteristiche del moto ondoso. L'obiettivo è ottenere una stima accurata della produzione energetica prevista, fornendo così una base solida per lo sviluppo successivo del capitolato tecnico.

Il capitolato tecnico, risultato diretto di tutte queste analisi e valutazione, fornisce una descrizione dettagliata delle specifiche tecniche e delle prestazioni attese per il dispositivo PeWEC. Inoltre, stabilisce le linee guida chiave per la realizzazione e l'implementazione del progetto, garantendo l'allineamento con gli obiettivi e le aspettative del committente.

## 2 Risultati ottenuti

In seguito alle attività svolte si possono rimarcare i seguenti risultati ottenuti:

- Definizione del layout e dei parametri ottimali per i diversi sottosistemi del dispositivo PeWEC, tra cui scafo, unità di conversione del pendolo, dimensionamento del generatore. I parametri ottimi sono riportati in Tabella 1.
- Valutazione delle prestazioni, prevedendo la produzione energetica attesa del dispositivo nel sito di installazione. In Figura 1 è rappresentata la produttività del sistema PeWEC progettato per il sito di Pantelleria.
- Studio approfondito dei carichi che incidono sui sistemi del PeWEC per garantire una progettazione robusta dei cuscinetti radiali di supporto del sistema pendolante. In Figura 1 è rappresentato il carico massimo generato dal pendolo progettato per il sistema PeWEC, per ogni stato di mare simulato.
- Redazione del capitolato tecnico come risultato integrato di tutte le analisi, fornendo dettagli specifici e obiettivi di prestazione chiari per il PeWEC.

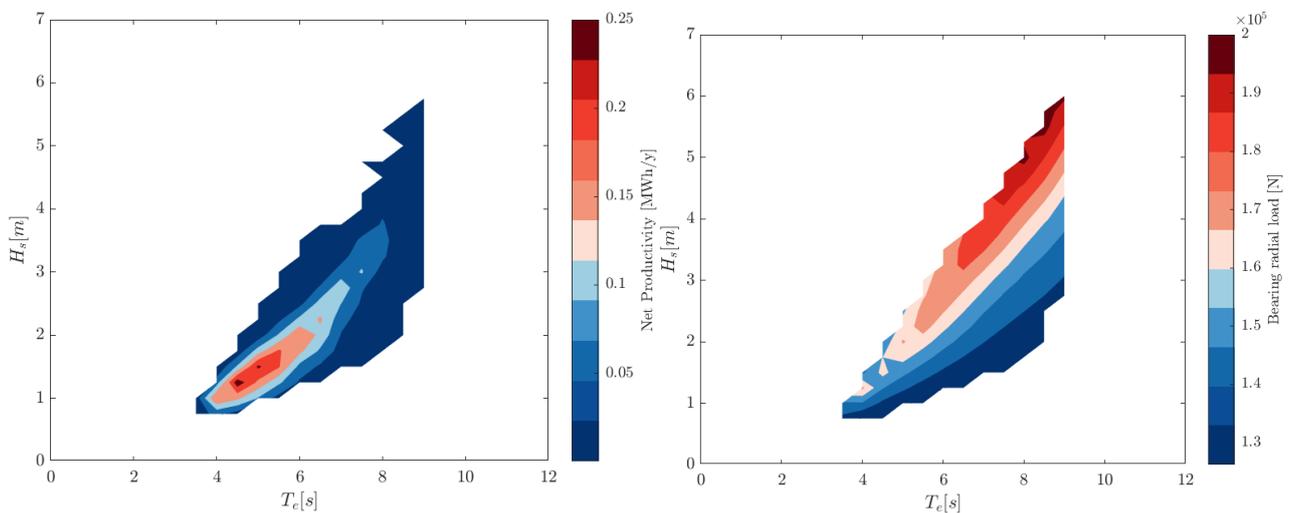


Figura 1 Scatter della produttività del dispositivo PeWEC (sinistra) e massimo carico radiale sui cuscinetti (destra).

### 3 Sintesi delle attività svolte

Per valutare le prestazioni del sistema, sono state condotte analisi utilizzando modelli sviluppati a diversi livelli di complessità e affidabilità. Inizialmente, è stato configurato un dispositivo ottimale mediante un algoritmo di ottimizzazione tecno-economica specifico per il PeWEC. A partire da tale configurazione ottimale, i parametri ideali sono stati selezionati, e tramite simulazioni effettuate con un modello ad alta fedeltà, sono state ottenute le prestazioni del dispositivo in termini di potenza netta sviluppata e, quindi di produttività. Quest'ultima valutazione considera le caratteristiche della risorsa ondosa nel sito di Pantelleria.

Nel dettaglio, l'analisi delle prestazioni energetiche del dispositivo si fonda su un modello non lineare, sia della dinamica del pendolo, eccitato parametricamente dallo scafo, sia degli accoppiamenti meccanici, i quali con l'idrodinamica impattano notevolmente sul moto dello scafo. Le simulazioni vengono condotte nel dominio del tempo, consentendo considerazioni non solo sui valori medi dei segnali, ma anche sui picchi di ciascuno di essi. Ciò offre la possibilità di dimensionare il sistema e gli elementi meccanici in modo accurato, consentendo l'estrapolazione dei carichi agenti sui cuscinetti di supporto dell'organo rotante, parte integrante del sistema pendolante. Inoltre, i parametri di controllo vengono ottimizzati onda per onda mediante un algoritmo di ottimizzazione vincolata, il quale tiene conto delle caratteristiche del motore, contribuendo così a massimizzare l'efficienza complessiva del dispositivo. In questo contesto, si considerano le non linearità del generatore, inclusi i vincoli di coppia e velocità massima, sia durante il funzionamento a regime che durante le fasi di transizione del generatore elettrico, quindi durante la fase di deflusaggio di quest'ultimo.

## 4 Dettaglio delle attività svolte

Partendo dalla configurazione ottimale del dispositivo PeWEC, ottenuta attraverso un processo di ottimizzazione, tramite algoritmo genetico, sono state eseguite analisi del dispositivo mediante modelli di simulazione più avanzati. Tali modelli sono basati sulla dinamica non lineare sia del pendolo, che delle forze scambiate con lo scafo. In tale contesto, le prestazioni del PeWEC sono ottenute considerando un algoritmo di controllo ottimale, valutato onda per onda. Da questo, è possibile calcolare anche i carichi che il pendolo scarica sullo scafo, informazioni utili per il dimensionamento dei cuscinetti di supporto.

### 4.1 Ottimizzazione e configurazione ottimale

In seguito all'operazione di ottimizzazione, si ottiene un dispositivo PeWEC i cui parametri ottimali sono riassunti in Tabella 1. Si noti che i parametri di progetto preliminare caratterizzano sia la geometria dello scafo, sia il sistema di conversione interno, *i.e.* il pendolo e il PTO. In particolare, i parametri che definiscono lo scafo sono la sua lunghezza totale  $L$  e la sua ampiezza  $W$ , la quale ha un impatto significativo sulla potenza totale in ingresso dell'onda sul sistema.

Inoltre, la caratteristica idrodinamica dello scafo è caratterizzata da due parametri di forma, quali  $h$  e  $k$ , il cui impatto sul profilo della chiglia è rappresentato in Figura 2.

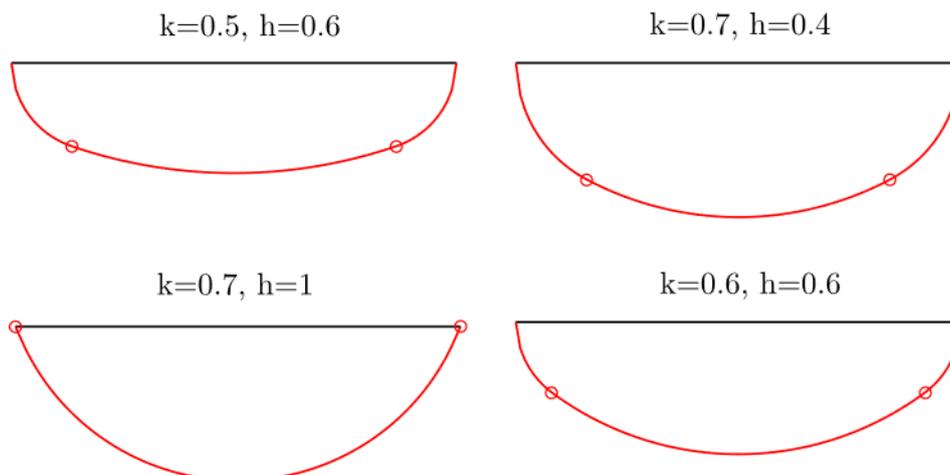


Figura 2 Impatto dei parametri geometri  $k$  e  $h$  sul profilo dello scafo.

Allo stesso modo, il sistema pendolo è parametrizzato tenendo conto di geometrie elementari. Questa scelta consente una definizione semplice, ma al contempo cattura in modo esaustivo il comportamento dinamico del sistema. In particolare, il pendolo è composto da un cilindro, oscillante attorno a una cerniera. Il volume del cilindro è calcolato dalla sua massa e densità ( $7800 \text{ kg/m}^3$ ). Considerando volume noto, il raggio e l'altezza sono definiti da un fattore di forma ( $d_p$ ), che è un parametro di progettazione libero, il quale determina la distribuzione di massa del pendolo, rispetto allo spazio disponibile. Definita la geometria, la lunghezza del braccio oscillante del pendolo è valutata attraverso il rapporto  $w_p$ , che tiene conto dello spazio disponibile nello scafo. Infine, l'altezza della cerniera è definita da un ulteriore parametro di progetto  $h_p$ . Si noti che la geometria relativa dello scafo e del pendolo consente una rotazione completa della massa oscillante attorno alla cerniera. Maggiori dettagli sulla parametrizzazione del sistema e sull'ottimizzazione del sistema PeWEC sono descritti in (Sirigu S. A., 2020).

**Tabella 1 Tabella dei parametri ottimi valutati dall'algorithmo di ottimizzazione genetica..**

Simbolo	Descrizione	Unità di Misura	Valore
$L$	Lunghezza dello scafo	$m$	7.50
$W$	Larghezza dello scafo	$m$	6.50
$h$	Fattore di forma dello scafo	–	1
$k$	Fattore di altezza dello scafo	–	0.95
$\alpha$	Fattore di immersione dello scafo	–	15.9
$BFR$	Fattore di distribuzione delle zavorre	–	1
$m_p$	Massa del pendolo	$kg$	10807
$d_p$	Fattore di forma del pendolo	–	1
$w_p$	Fattore di lunghezza del braccio della massa pendolare	–	1.92
$h_p$	Fattore di posizionamento del pendolo nello scafo	–	0.57
$nUnits$	Numero di unità pendolari installate nello scafo	–	1
$PTO ID$	Indice da catalogo dei generatori selezionati per il dispositivo PeWEC	–	37

## 4.2 Descrizione del PeWEC

Il sistema PeWEC, ottimamente adattato al sito prescelto di Pantelleria, è dettagliatamente descritto in questa sezione, prendendo in considerazione i due sottosistemi principali: lo scafo e il pendolo.

### 4.2.1 Scafo

Lo scafo è un'opera di carpenteria navale e deve essere realizzato in acciaio, successivamente verniciato, progettato secondo normativa per resistere ai carichi massimi generati in qualsiasi condizione, compresi quelli trasmessi dal sistema di ormeggio e dalle attrezzature ospitate, quando esposti all'accelerazione indotta dal moto ondoso.

Lo scafo deve prevedere all'interno un'interfaccia di collegamento per l'unità di conversione pendolo (progettato adeguatamente per supportare i carichi) e deve prevedere un'apertura sulla coperta per la corretta installazione dei vari sistemi (unità pendolo, quadri elettrici). Devono essere previsti come da disegno preliminare due gavoni a poppa e prua per la locazione della zavorra. Deve essere inoltre dotato di tutti gli elementi di sicurezza e accesso per gli operatori per il montaggio e manutenzione del sistema.

In Figura 3 **Error! Reference source not found.**, è riportata una prima rappresentazione dello scafo, da considerarsi come preliminare e indicativa. Le immagini hanno come scopo la descrizione del layout previsto del dispositivo, le geometrie, i componenti e relativi ingombri.

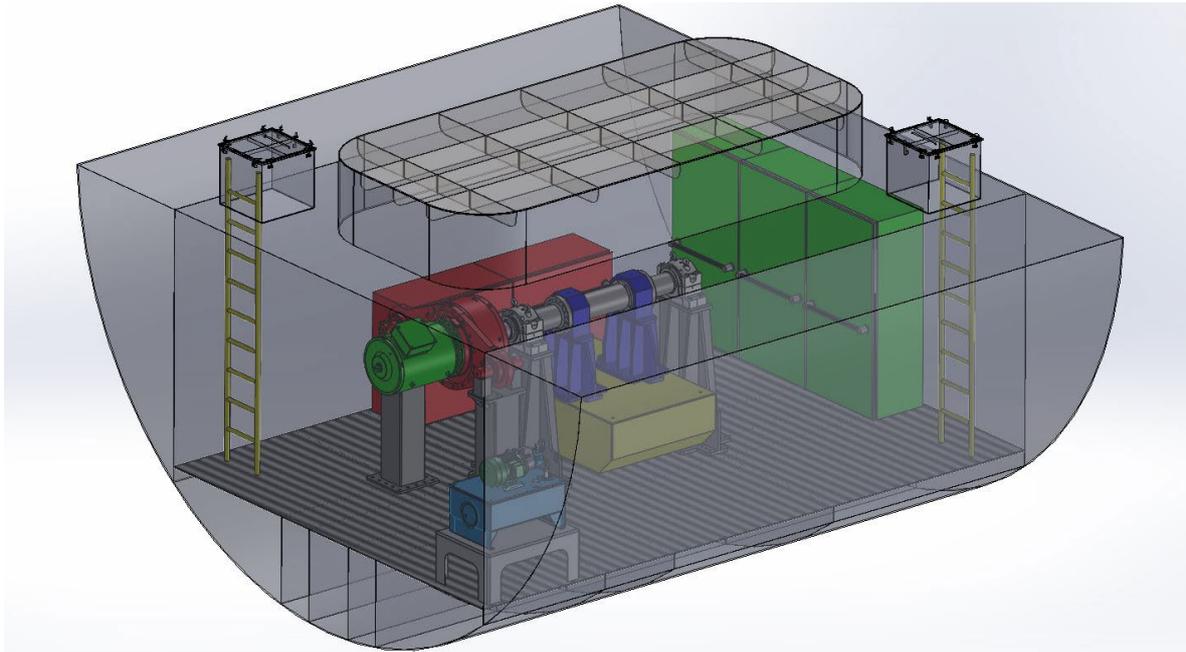


Figura 3 PeWEC – Rappresentazione preliminare del PeWEC, vista assometrica.

Nelle immagini sono riportati i diversi componenti con colori differenti, da ognuna delle viste si possono notare: lo scafo con i due gavoni per le zavorre laterali, l'unità pendolo, gli armadi elettrici (in verde), il sistema per il raffreddamento del generatore, i due accessi dal ponte principale con le relative scale e infine la sovrastruttura dalla coperta necessaria a creare lo spazio per un eventuale completa rotazione del pendolo.

#### 4.2.2 Dimensioni dello Scafo

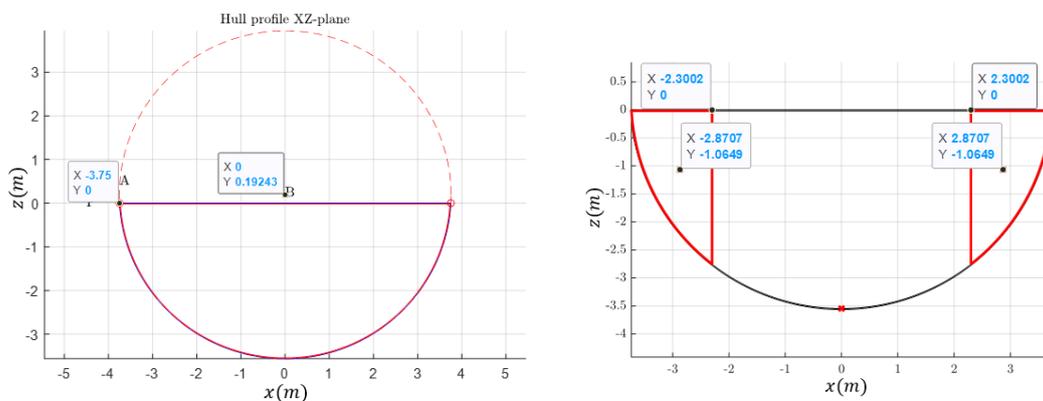
Nella Tabella 2 Dimensioni e dati dello scafo. Tabella 2 **Error! Reference source not found.** sono riassunte le dimensioni ed i parametri relativi al sistema scafo, questi dati includono le dimensioni dello scafo (lunghezza, larghezza e altezza), la curvatura dello stesso, il pescaggio, le coordinate del centro di gravità del dispositivo e il momento d'inerzia a beccheggio. Questi vincoli devono essere rispettati per un corretto funzionamento di PeWEC. Sono riportate le stime preliminari delle masse dello scafo, unità pendolo e zavorre. È essenziale che i valori geometrici dello scafo, inerzie, CoG e posizione del fulcro del pendolo, siano garantiti durante la progettazione in quanto parametri che influenzano la dinamica della macchina.

Tabella 2 Dimensioni e dati dello scafo.

Simbolo	Descrizione	Unità di Misura	Valore
$L$	Lunghezza dello scafo	$m$	7.50
$W$	Larghezza dello scafo	$m$	6.50
$H$	Altezza dello scafo (coperta-chiglia)	$m$	3.56
$h$	Curvatura dello scafo	\	3.75
$D$	Pescaggio a pieno carico	$m$	2.49
$COG_{WL}$	Coordinate Centro di Gravità del Dispositivo rispetto alla linea d'acqua	$m$	[0; 0; -0.257]

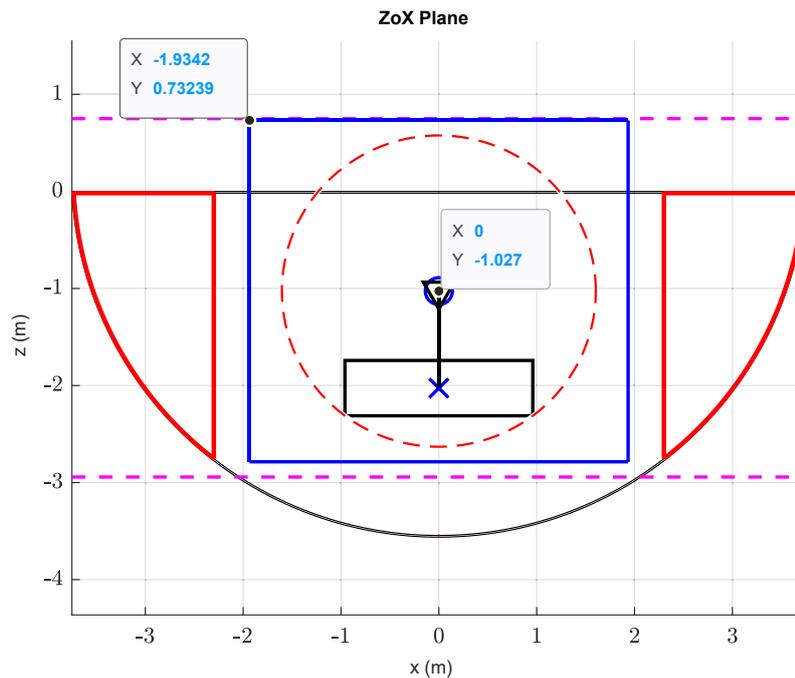
$COG_{keel}$	Coordinate Centro di Gravità del Dispositivo rispetto alla chiglia	$m$	$[0; 0; +2.238]$
$I_{yy-pitch}$	Momento d'inerzia a Pitch del dispositivo rispetto al COG	$kgm^2$	$6.096 * 10^5$
$I_{xx-roll}$	Momento d'inerzia a Roll del dispositivo rispetto al COG	$kgm^2$	$3.711 * 10^5$
$I_{zz-yaw}$	Momento d'inerzia a Yaw del dispositivo rispetto al COG	$kgm^2$	$8.287 * 10^5$
$m_d$	Massa del volume di fluido spostato	$t$	85.7
$m_{hull}$	Massa scafo (stima preliminare)	$t$	22.6
$m_{ballast,1}$	Massa zavorra n.1 (stima preliminare)	$t$	24
$m_{ballast,2}$	Massa zavorra n.2 (stima preliminare)	$t$	24
$m_{unit}$	Massa unità pendolo (stima preliminare)	$t$	15,1
$Z_{fulcro}$	Coordinata z del fulcro del pendolo (rispetto alla coperta)	$m$	-1,03
$H_{sc}$	Altezza della sovracoperta (stima preliminare)	$m$	0.73

La chiglia dello scafo è costruita a partire da una circonferenza di raggio  $3.75 m$  e l'altezza dello scafo (chiglia-coperta) è di  $3.56 m$  come mostrato in Figura 4 che riporta anche la posizione preliminare delle paratie dei gavoni di poppa e prua (zavorra sabbia) e relativo centro di gravità.



**Figura 4 PeWEC –Profilo della chiglia dello scafo (sinistra). Posizione preliminare delle paratie dei gavoni per le zavorre (sabbia) di poppa e prua e relativo centro di gravità (destra).**

In Figura 5 **Error! Reference source not found.** è schematizzato l'ingombro in vista frontale dell'unità pendolo e delle zavorre. La posizione del fulcro del pendolo all'interno dello scafo e la sua distanza con il CoG del dispositivo sono valori di progetto essenziali da rispettare per il corretto funzionamento del sistema.



**Figura 5 PeWEC – Vista laterale. In rosso è riportato l'ingombro delle zavorre. Il quadrato blu indica approssimativamente gli ingombri dell'unità pendolo e della sovracoperta. Il marker triangolo indica il fulcro del pendolo e sue coordinate.**

#### 4.2.3 PENDOLO

La tecnologia PeWEC si basa su un'unità pendolo che costituisce il nucleo del dispositivo. Tale sottoinsieme è composto dalle due seguenti parti principali:

- Una struttura di supporto (fondazione), collegata alle travi strutturali del fondo dello scafo, con lo scopo di sostenere il gruppo del pendolo e la parte statica del generatore elettromagnetico e riduttore. La fondazione è dotata di punti di sollevamento per consentirne l'installazione e la rimozione dallo scafo.
- Il pendolo, che è collegato alla struttura di supporto per mezzo di due cuscinetti opportunamente scelti e dimensionati, consente l'oscillazione del pendolo creata dal moto ondoso. L'albero del pendolo è collegato da un lato al gruppo riduttore/generatore elettrico tramite giunto opportunamente dimensionato.

Anche per il pendolo, in Figura 6 è riportata una prima rappresentazione preliminare dell'unità pendolo al fine di descriverne il layout, le geometrie, i componenti menzionati e relativi ingombri.

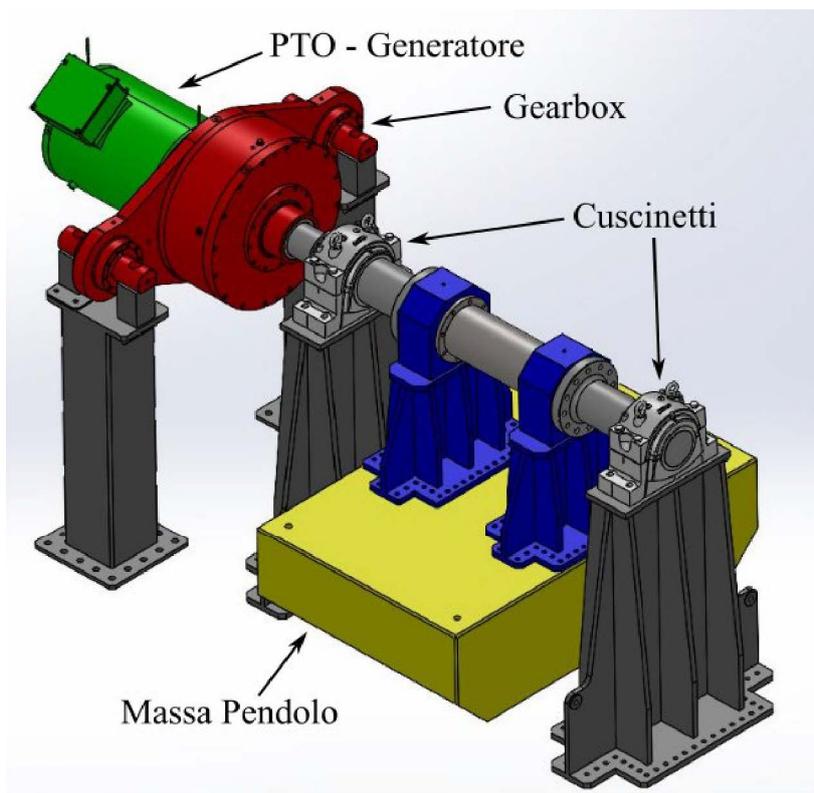


Figura 6 PeWEC- Rappresentazione generale dell'unità pendolo, vista assonometrica.

#### 4.2.4 Progettazione del pendolo

I parametri di progetto del pendolo sono ottenuti a valle di un processo di ottimizzazione e sono riassunti di seguito nella Tabella 3. Tali parametri sono le dimensioni geometriche, l'inerzia e la massa del pendolo ed i valori devono essere considerati come valori fissi. Le restanti caratteristiche progettuali sono derivate da questi parametri.

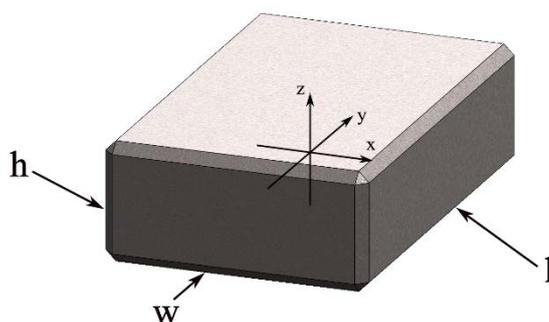


Figura 7 PeWEC – Geometria del pendolo.

Tabella 3 Caratteristiche del pendolo ottenute a valle dell'ottimizzazione preliminare.

Simbolo	Descrizione	Unità di Misura	Valore
$I_{yy-m_p}$	Momento di inerzia attorno all'asse y della massa del pendolo	$kgm^2$	3612
$m_p$	Massa del pendolo	t	10.81

$h$	Altezza del pendolo	$m$	0.57
$d_p$	Lunghezza del pendolo (distanza fulcro – CoG pendolo)	$m$	1.00
$l$	Lunghezza del pendolo	$m$	1.27
$w$	Larghezza del pendolo	$m$	1.92
$I_{\varepsilon-m_p}$	Momento di inerzia attorno all'asse $\varepsilon$ della massa del pendolo	$kgm^2$	14420

### 4.3 Valutazione della produttività e valutazione dei carichi sui cuscinetti

Il processo di ottimizzazione, i cui risultati sono stati precedentemente presentati, viene tipicamente eseguito nel dominio delle frequenze a causa della sua efficienza computazionale, che consente la valutazione di un gran numero di configurazioni del dispositivo. Tuttavia, quando si tratta di simulazioni nel dominio del tempo è necessario adottare un approccio diverso.

Per condurre simulazioni nel dominio del tempo, il cui schema è introdotto in Figura 8, è necessario caratterizzare i vari fenomeni fisici che intercorrono nel processo di trasformazione dell'energia: il modello di simulazione dello scafo, la valutazione delle forze di reazione retroazione dal pendolo sullo scafo, il modello di moto del pendolo e quindi la progettazione dei parametri di controllo e la rappresentazione del fenomeno ondoso. Dettagli sulla loro rappresentazione matematica nel tool sviluppato, sono riportati di seguito.

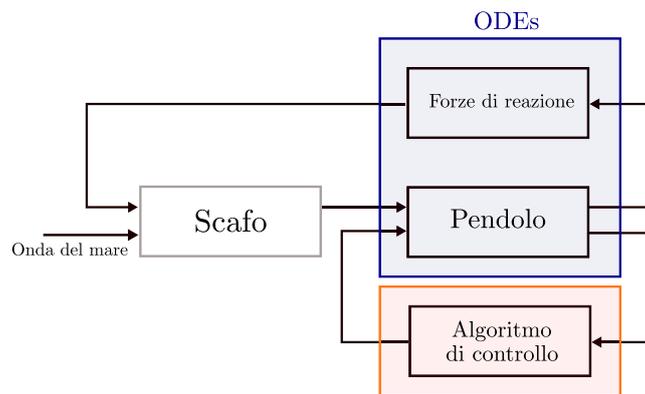


Figura 8 Schema di simulazione di un WEC inerziale, basato sulla tecnologia del pendolo (PeWEC).

- **Modello simulato:** Per catturare con precisione statistica i valori massimi dei segnali, la simulazione del sistema PeWEC sono eseguite ricorrendo al modello non-lineare del sistema. In particolare, mentre il modello adottato per esprimere l'interazione fluido-struttura ricorre all'equazione di Cummins (Cummins, 1962), che rappresenta l'idrodinamica dello scafo tramite un'equazione lineare, la dinamica dell'interazione pendolo scafo; quindi, le forze scambiate tra i due corpi, è espressa tramite termini non lineari, inglobando tutti gli effetti centrifughi e di Coriolis. Durante la simulazione, viene valutata la potenza netta assorbita dal dispositivo PeWEC, calcolata considerando tutte le perdite di potenza. Le perdite includono vari fattori come perdite di potenza di natura meccanica, come perdite dovute all'attrito dei cuscinetti di supporto, o perdite di potenza elettrica, dipendendoti dall'efficienza del generatore, piuttosto che l'emissione di potenza per alimentare l'apparato sia elettrico, sia elettronico dell'apparato di conversione (Pozzi, 2018).
- **Controllo:** Il controllo reattivo è adottato come algoritmo per la definizione della coppia ottima che il generatore elettrico deve applicare. I parametri di tale strategia di controllo sono ottimizzati ricorrendo ad un algoritmo di ottimizzazione vincolata. Il processo di ottimizzazione mira alla selezione di parametri che massimizzano la potenza netta in uscita del PeWEC, soddisfacendo determinati vincoli. Uno dei vincoli imposti alla progettazione del controllo è legato al valore efficace (rms) della velocità del PTO. La velocità del PTO dovrebbe rispettare una velocità nominale specificata dal motore, indicata come  $\omega_{nom}$ . Questo vincolo assicura che il PTO operi entro un intervallo specificato ed evita velocità eccessive che potrebbero causare problemi meccanici o operativi. Una funzione di saturazione della coppia è inclusa nella progettazione del controllo. Questa funzione limita la coppia del generatore  $f_{pto}$  ed evitare che superi una determinata soglia, che dipende dai dati di targa del generatore come  $T_{max}$  e  $T_{nom}$  (i valori sintetici di targa del generatore scelto sono riportati in Tabella 4). Incorporando, quindi, le caratteristiche di coppia e potenza del generatore, le quali sono rappresentate in **Error! Reference source not found.**, il sistema di controllo può essere progettato per ottenere prestazioni ottime e stabilità operativa del dispositivo PeWEC (F. Carapellese, 2022).

- Generazione delle onde:** Per tener conto della variabilità e delle proprietà statistiche del fenomeno ondoso, la simulazione viene condotta utilizzando molteplici realizzazioni dell'onda. Nello specifico, la simulazione utilizza 20 realizzazioni di un'onda, dove ogni realizzazione rappresenta un'istanza diversa delle condizioni dell'onda. Queste realizzazioni sono generate per catturare la variabilità e la casualità associate al fenomeno della propagazione delle onde. Il tempo di simulazione per ogni realizzazione è impostato su  $T_s = 900$  s, garantendo una rappresentazione adeguata delle caratteristiche dell'onda nel periodo di tempo specificato (Alexis Merigaud, 2017) (F. Carapellese, 2022).

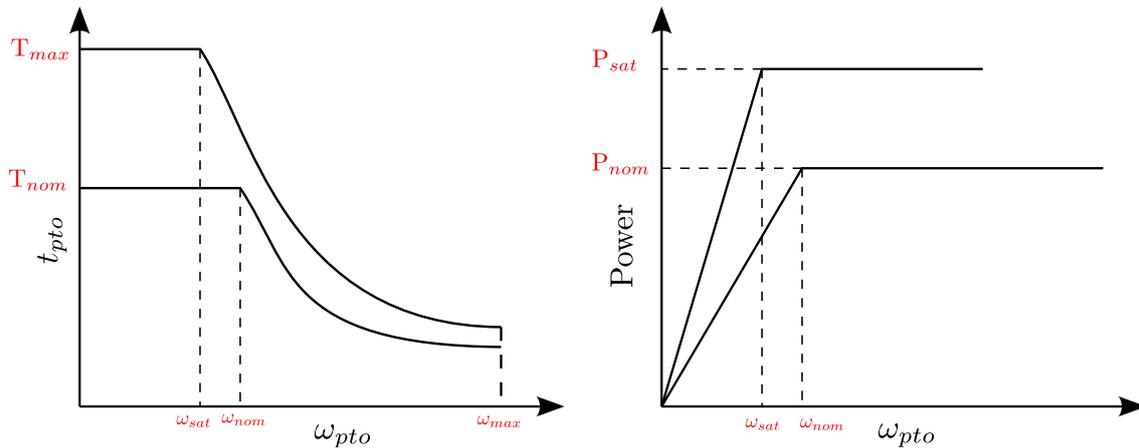


Figura 9 Caratteristiche di coppia e potenza del moto selezionato e caratterizzazione dei valori sintetici.

Tabella 4 Dati sintetici riferiti alla caratterizzazione del generatore elettrico.

Simbolo	Descrizione	Unità di Misura	Valore
$T_{nom}$	Coppia nominale del generatore elettrico selezionato	$Nm$	3500
$T_{max}$	Coppia massima del generatore elettrico selezionato	$Nm$	5700
$\omega_{nom}$	Velocità angolare nominale del generatore elettrico selezionato	$rad/s$	15
$\omega_{max}$	Velocità angolare massima del generatore elettrico selezionato	$rad/s$	21
$\omega_{sat}$	Velocità angolare di saturazione	$rad/s$	11

#### 4.3.1 Risultati

In base alla struttura proposta nella Sezione precedente, si ricorre alla simulazione del dispositivo PeWEC, per un set di 50 onde, le quali caratterizzano significativamente la distribuzione energetica della risorsa nel sito di installazione. Si consideri che la produttività del dispositivo, associata ad ogni onda, è calcolata come segue:

$$Produttività_{netta,i} = P_{n,i} \times (Occ_i/100) \times 8760h/y,$$

dove  $P_{n,i}$  è la potenza prodotta da PeWEC riferita alla  $i$ -esima onda, e  $Occ_i$  è l'occorrenza, in termini percentuali, di tale onda, associata al sito preposto. La mappa della produttività del dispositivo PeWEC è rappresentata in Figura 10.

Invece, la produttività netta totale di PeWEC, definita come segue

$$Produttività_{netta} = \sum_{i=1}^{50} Produttività_{netta,i}$$

è di 5.02 MWh/y, considerando Pantelleria come sito d'installazione.

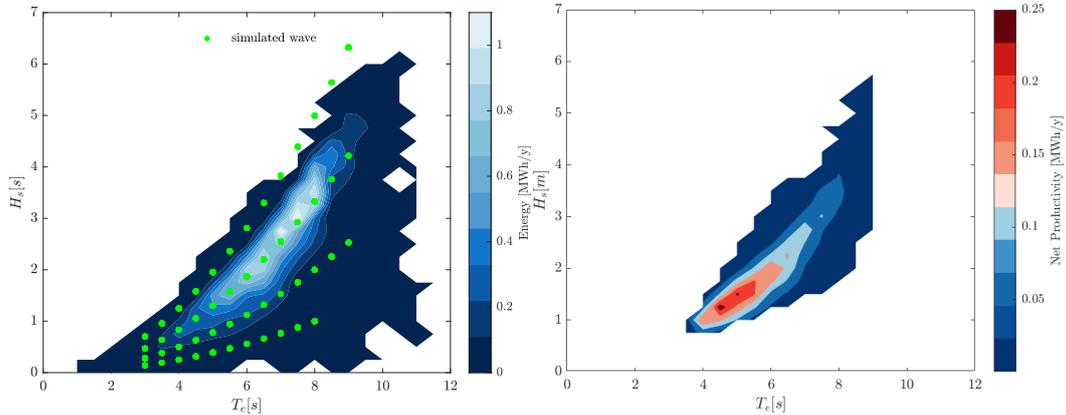


Figura 10 Scattar delle occorrenze del sito di Pantelleria (sinistra) e mappa della produttività (destra).

Dettagli sulla potenza lorda e netta sviluppata dal dispositivo PeWEC, per l'insieme di onde selezionato, è rappresentato in Figura 11. Come precedentemente riportato, la potenza è valutata, tramite l'applicazione di un controllo di tipo reattivo, i cui parametri sono selezionati per rispettare i vincoli fisici del generatore elettrico. In tale proposito i valori sia massimi, sia efficaci di velocità angolare e coppia sviluppati dal generatore elettrico sono riportate in Figura 12 e Figura 13.

Il modello descritto permette anche la valutazione dei carichi generati dal pendolo, i quali si scaricano sui cuscinetti meccanici che hanno anche la funzione di supporto del sistema rotante. In particolare, Figura 14 rappresenta schematicamente una possibile configurazione di cuscinetti, la quale dovrà assorbire un carico totale radiale, generato dai due componenti  $F_{rad_x}$  e  $F_{rad_z}$ . In particolare, il carico totale, calcolato come modulo del vettore sommatoria di  $F_{rad_x}$  e  $F_{rad_z}$  è rappresentato in Figura 14, per l'insieme delle onde simulate. Si ricorda che tali valori risultano fondamentali per il dimensionamento dei cuscinetti, in seguito alla scelta del loro schema di posizionamento.

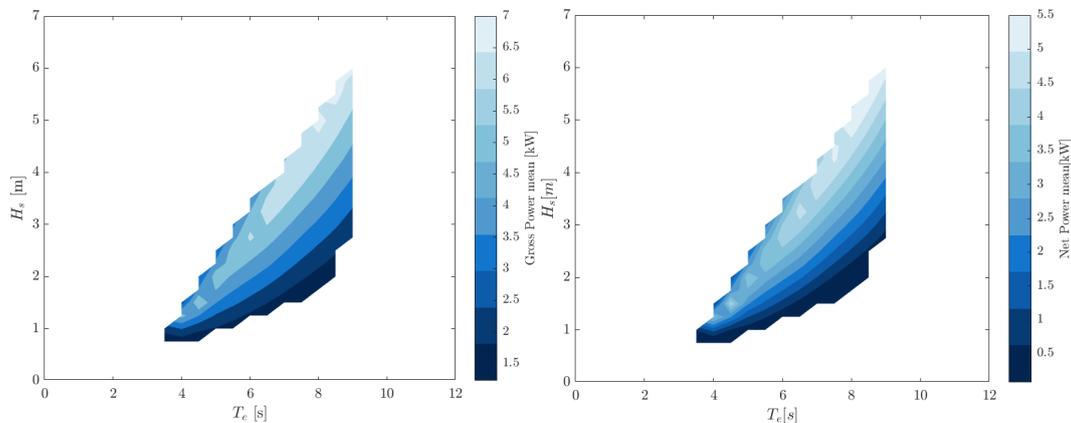


Figura 11 Mappa di potenza prodotta da PeWEC: potenza lorda (sinistra) e potenza netta (destra).

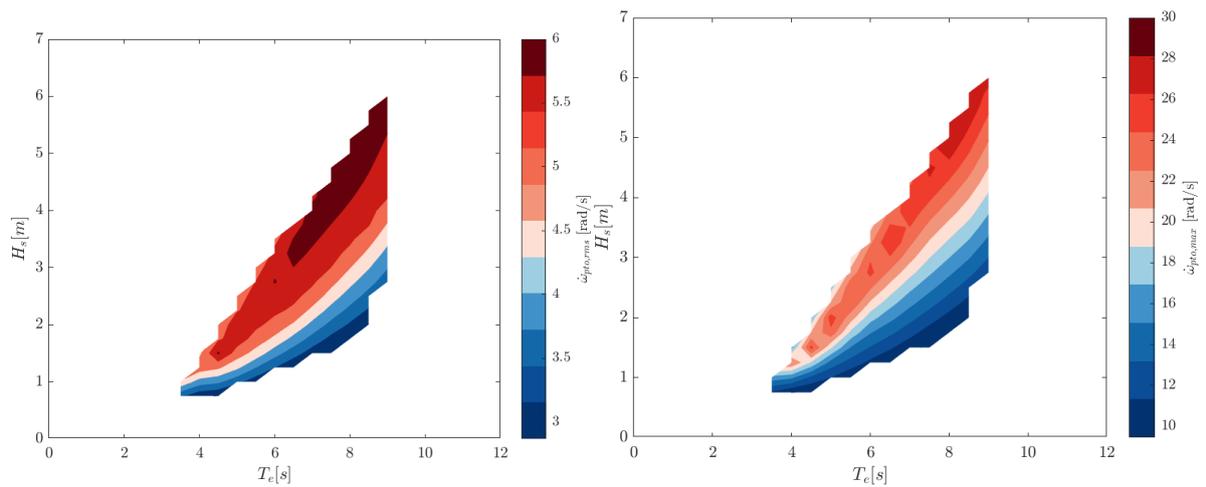


Figura 12 Mappa dei valori di velocità angolare del generatore elettrico: valore efficace (sinistra) e valore massimo (destra).

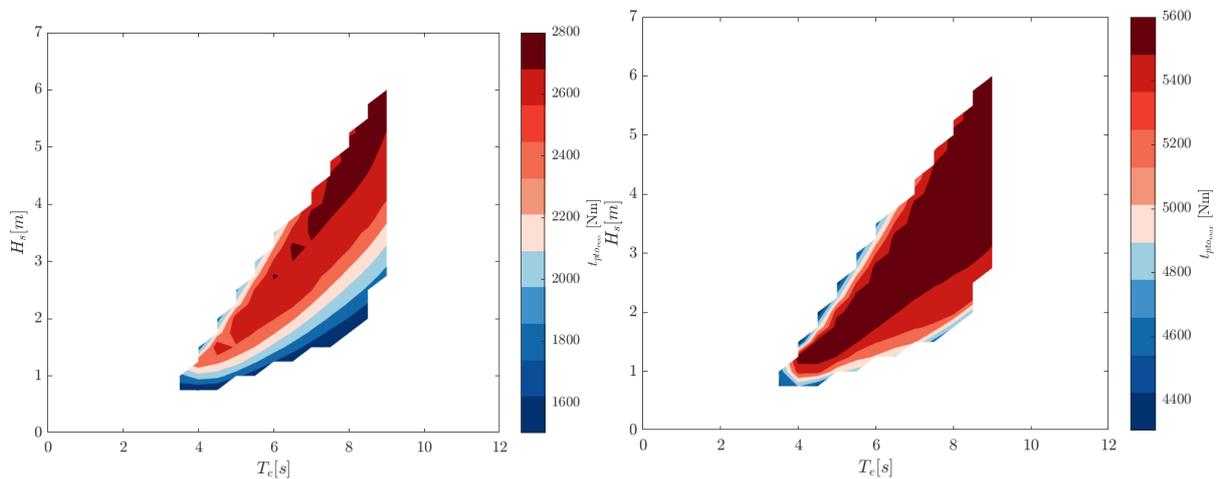


Figura 13 Mappa dei valori di coppia del generatore elettrico: valore efficace (sinistra) e valore massimo (destra).

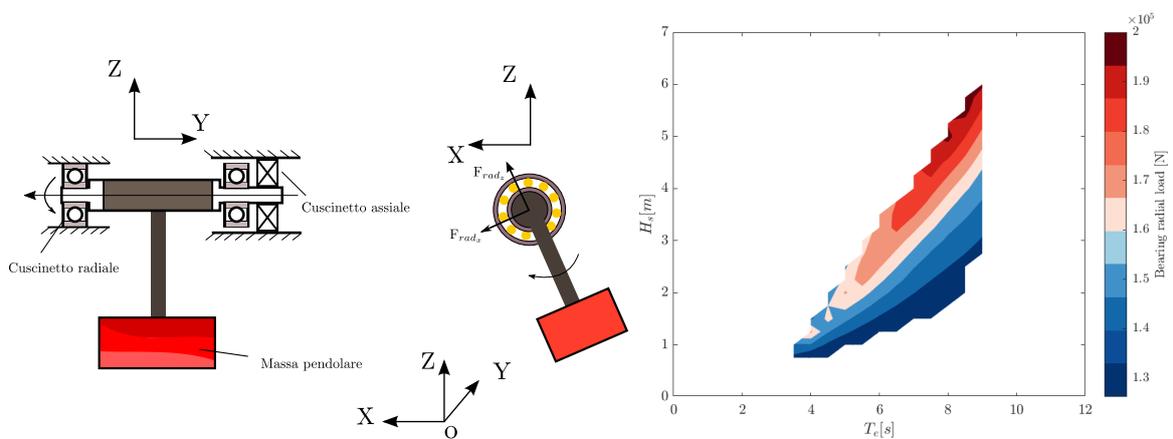


Figura 14 Schema dei carichi agenti sui cuscinetti del meccanismo di conversione (sinistra) e valore massimo del carico complessivo valutato numericamente (destra).

## 5 Bibliografia

- Alexis Merigaud, J. R. (2017). Free-Surface Time-Series Generation for Wave Energy Applications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*.
- Cummins, W. (1962). THE IMPULSE RESPONSE FUNCTION AND SHIP MOTIONS,. *Symposium on Ship Theory Institut at the flir Schiffbau der Universitit Hamburg*. Hamburg.
- F. Carapellese, E. P. (2022). Intuitive LTI energy-maximising control design for wave energy converters: the PEWEC case. *Ocean Engineering*.
- Pozzi, N. (2018). *Numerical Modeling and Experimental Testing of a Pendulum Wave Energy Converter (PeWEC)*.
- Sirigu S. A., F. L. (2020). Techno-Economic Optimisation for a Wave Energy Converter via Genetic Algorithm. *Journal of Marine Science and Engineering*.