



Basic design del prototipo PEWEC

S.A. Sirigu, O. Dell'Edera, B. Paduano, E. Pasta, E. Giglio, G.
Bracco, G. Mattiazzo

BASIC DESIGN DEL PROTOTIPO PEWEC

S.A. Sirigu , O. Dell'Edera, B. Paduano, E.Pasta, E. Giglio , G. Bracco, G. Mattiazzo

Marzo 2022

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: 1.8 Energia elettrica dal mare

Work package: WP1 – Energia elettrica dal mare

Linea di attività: LA1.21: Basic design del prototipo

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

1.	SOMMARIO.....	5
2.	INTRODUZIONE.....	6
3.	PARAMETRIZZAZIONE E OTTIMIZZAZIONE DEL DISPOSITIVO	7
3.1.	RISULTATI DELL'OTTIMIZZAZIONE FINALE COP/AEP RELATIVI A PANTELLERIA.....	9
4.	CARATTERISTICHE SCAFO OTTIMALE	13
4.1.	PRESTAZIONI DEL DISPOSITIVO OTTIMO NEI SITI MEDITERRANEI	16
4.2.	PRESTAZIONI DEL DISPOSITIVO OTTIMO A PANTELLERIA	18
5.	SISTEMI DI CONTROLLO AVANZATI	22
5.1.	STRATEGIA DI CONTROLLO DATA-DRIVEN: RETI NEURALI E RANDOM FOREST	22
5.2.	DEFINIZIONE DELLA STRUTTURA DEL METAMODELLO.....	22
5.2.1.	ALBERI DI REGRESSIONE E RANDOM FORESTS	23
5.2.2.	RETI NEURALI.....	24
5.2.3.	DEFINIZIONE DEL SET DI INPUT DEL METAMODELLO	25
5.2.4.	DEFINIZIONE DELLA STRATEGIA DI APPRENDIMENTO	25
5.2.5.	DEFINIZIONE DELLA DURATA DEL CONTROLLO.....	28
5.3.	VALUTAZIONE DELLE DIFFERENTI CONFIGURAZIONI DI METAMODELLO: SIMULAZIONE DI APPRENDIMENTO ANNUALE	28
5.3.1.	RISULTATI DELLA SIMULAZIONE DI APPRENDIMENTO	31
5.3.2.	CONCLUSIONI SU CONTROLLO DATA-DRIVEN	33
6.	ANALISI METEOCEAN DEL SITO DI INSTALLAZIONE	34
6.1.	ENVIRONMENTAL CONTOUR	35
6.1.1.	METODO GLOBALE	35
6.1.2.	METODO DEGLI EVENTI ESTREMI	35
6.2.	SCELTA DELLA DISTRIBUZIONE PER IL MODELLO DI NATAF	36
6.3.	ENVIRONMENTAL CONTOUR: METODO DI NATAF	36
6.4.	EC: METODO CMA.....	37
6.5.	CONFRONTO TRA I MODELLI	38
6.6.	ANALISI DEGLI EVENTI DI BREVE DURATA.....	38
7.	PROPRIETÀ DEL SISTEMA DI ORMEGGIO	45
7.1.	METODO DI DESIGN	45
8.	DEFINIZIONE DELLA FUNZIONE DI COSTO.....	49
8.1.	FUNZIONI DI COSTO DELLO SCAFO	49
8.2.	FUNZIONI DI COSTO DELL'UNITÀ PENDOLO DI CONVERSIONE	50
8.3.	FUNZIONI DI COSTO DEL SISTEMA DI ORMEGGIO.....	51
8.4.	FUNZIONI DI COSTO DEL CAVO ELETTRICO	54

9.	PROCEDURE DI COSTRUZIONE E INSTALLAZIONE	56
9.1.	DURATA DELLE OPERAZIONI.	56
9.2.	RISORSE DI MEZZI E OPERATORI (CON COSTI).	57
10.	STIMA PRELIMINARE DEL COSTO DELL'IMPIANTO PEWEC	58
11.	ANALISI PRELIMINARE FATTIBILITÀ TECNICA	62
11.1.	ANALISI SOLUZIONI COSTRUTTIVE DEL PENDOLO	62
11.1.1.	GEOMETRIA DEL PENDOLO: CILINDRICO SEMI-RIEMPITO	63
11.2.	CONFRONTO DELLE GEOMETRIE PER UNA LARGHEZZA FISSATA	65
12.	POSSIBILI CONFIGURAZIONI INTERNE PER PEWEC	67
12.1.	PENDELO IN GHISA	67
12.2.	PENDELO IN CEMENTO	68
12.3.	PARAGONE FRA LE DIVERSE SOLUZIONI	70
12.4.	CONFIGURAZIONE PTO.....	70
12.5.	CONFIGURAZIONE ELETTRICA INTERNA PEWEC E CONNESSIONE ALLA RETE	73
13.	SVILUPPI FUTURI.....	76
13.1.	SCAFO IN CALCESTRUZZO.....	76
13.2.	PANNELLI SOLARI SULLO SCAFO.....	76
13.3.	SISTEMI DI ORMEGGIO INNOVATIVI.....	76
13.4.	PTO IDRAULICO	77
13.5.	CONTROLLO PREDITTIVO MODEL BASED (MPC CONTROL)	78
14.	CONCLUSIONI	80
15.	APPENDICE.....	82
15.1.	RISULTATI SIMULAZIONE DISPOSITIVO OTTIMO A PANTELLERIA.....	82
15.2.	TEORIA DELLA PROBABILITÀ	83
15.2.1.	PROBABILITÀ DI UNA VARIABILE CASUALE	83
15.2.2.	PROBABILITÀ CONGIUNTA DI DUE VARIABILI CASUALI	84
15.2.3.	PROBABILITÀ CONDIZIONATA DI DUE VARIABILI CASUALI	84
15.2.4.	CORRELAZIONE FRA DUE VARIABILI CASUALI	84
15.2.5.	TRASFORMAZIONE DI NATAF PER DUE CDF.....	85
15.2.6.	TRASFORMAZIONE DALLO SPAZIO STANDARD U ALLO SPAZIO REALE.....	86
16.	ACRONIMI	87
	BIBLIOGRAFIA	88

1. Sommario

Il report riassume il lavoro di progettazione del prototipo PeWEC effettuato nell'ambito della linea di attività LA1.21 del progetto. Obiettivo di questo documento è la descrizione del processo di ottimizzazione e progettazione preliminare di un innovativo convertitore di energia da moto ondoso basato sulla tecnologia del pendolo inerziale e chiamato PeWEC (Pendulum Wave Energy Converter). Il percorso di progettazione parte dalla definizione e caratterizzazione del sito di installazione, le cui informazioni principali sono le caratteristiche geofisiche del sito: batimetria, tipologia di fondale marino, lontananza dalla costa e caratteristiche meteomarine fondamentali per determinare l'analisi della produttività della macchina e per la determinazione degli stati di mare estremi. Nei precedenti documenti del progetto sono stati presentati gli strumenti numerici di ottimizzazione, valutazione della produttività e di progettazione del sistema PeWEC con particolare focus sulla componente più innovativa e critica del sistema: il sistema di ormeggio. L'ormeggio di questo tipo di convertitori deve raggiungere un duplice obiettivo: garantire la sopravvivenza del natante durante una mareggiata estrema e avere un basso impatto sulla dinamica del sistema e quindi sulla produttività del dispositivo durante gli stati di mare moderati e operativi. Dunque, è stato sviluppato un concept di ormeggio basato su catenarie e galleggianti per soddisfare entrambi gli obiettivi, e tramite simulazioni numeriche le caratteristiche dell'ormeggio sono state iterate per garantire le richieste della normativa vigente in termini di sicurezza e carichi applicati. Le caratteristiche del dispositivo invece, quali dimensioni, masse taglia del generatore, sono state ottenute tramite un innovativo processo di ottimizzazione basato su algoritmi genetici che consentono di individuare dispositivi ottimali da un punto di vista tecno-economico. Una parte fondamentale del documento tratta la questione delle funzioni di costo del dispositivo, che sono fondamentali per determinare la suddivisione dei costi del convertitore e individuare quindi i sottosistemi impattanti e su cui operare una riduzione costi. In seguito, si discute delle diverse possibili realizzazioni del sistema pendolare, analizzando diversi metodi realizzativi per la riduzione dei costi di questo sistema. La conclusione di questa analisi è la possibilità di adottare il calcestruzzo per la realizzazione di pendoli a forma di parallelepipedo al fine di una riduzione di costi. Nell'ultima parte di documento invece vengono discusse le possibili innovazioni tecnologiche che possono portare a sostanziali riduzioni di costo del dispositivo a fronte di quanto analizzato in questo progetto. Le più promettenti vie per la riduzione del costo dell'energia vengono individuate nell'adozione di sistemi di ormeggio costituiti da linee sintetiche, costruzione dello scafo in calcestruzzo armato, adozione di Power Take Off idraulici, integrazione con impianto fotovoltaico in coperta. Si vuole evidenziare che la finalità di questo documento risiede nella descrizione di una metodologia di progettazione del convertitore PeWEC e di come questo sia un primo risultato derivante da un'iterazione perfezionabile con i risultati ottenuti durante gli studi condotti durante il progetto. Si prevedono quindi successive iterazioni con implementazione delle innovazioni prima descritte con il fine di ridurre il costo dell'energia di questa tecnologia e renderla commercialmente realizzabile.

2. Introduzione

La progettazione di un dispositivo di conversione dell'energia da moto ondoso richiede una serie di step dettati dalla necessità di investigare il campo di applicazione di una tecnologia così innovativa e la sua efficacia. Lasciando come fine ultimo la definizione di un dispositivo che sia affidabile, economico e produttivo, è necessario utilizzare dei modelli matematici affidabili per la progettazione di un dispositivo.

I modelli ma più in generale i processi e le metodologie applicate variano molto nel corso della fase di progettazione del dispositivo. Si inizierà infatti da un modello semplificato per investigare tutte le possibili variazioni di geometrie e proprietà. Tali modelli si basano su algoritmi di ottimizzazione e si occupano dell'individuazione dei parametri di progetto essenziali della macchina (dimensioni, distribuzione inerzie, caratteristiche del pendolo, taglia del generatore). Il vero e proprio dimensionamento della macchina è da eseguire però con modelli ad affidabilità più elevata seguendo dei procedimenti basati su analisi statistiche, spesso dettati dalle normative vigenti in campo nazionale ed internazionale. Lo scopo primario di questo documento è quindi, quello di riassumere la metodologia applicata per la definizione delle proprietà dello scafo al vero.

Il primo passo, strettamente collegato alla definizione dell'ormeggio, è quello di definire i dati meteorologici da utilizzare nelle analisi. Il dimensionamento del sistema di ormeggio, si basa in genere su un'analisi statistica su condizioni a lungo termine, tramite la definizione dei contorni estremi (Environmental Contour). La valutazione degli stati di mare è stata fatta considerando il sito a largo di Mazara del Vallo, considerando i dati RON (Rete Ondametrica Nazionale). Tale analisi è portata avanti tramite la costruzione dell'Environmental Contour (EC) che definito un periodo di ritorno, ovvero la probabilità che uno stato di mare si verifichi in un anno, descrive gli stati di mare per il dimensionamento. Successivamente si procede a un'analisi sul breve periodo andando a determinare gli stati di mare dall'EC e si verifica che l'ormeggio progettato supporti i carichi a cui è soggetto in queste condizioni.

La definizione dell'ormeggio avviene quindi tramite le simulazioni di un modello numerico. Il modello scelto è sviluppato in OrcaFlex, un software che consente di simulare nel dominio del tempo un sistema di ormeggio. In tale software viene quindi accoppiata un'idrodinamica basata su software BEM con un ormeggio dinamico. L'ormeggio viene quindi testato tramite simulazioni in onda estrema per la verifica dei carichi. Si verifica che le tensioni nelle linee siano inferiori rispetto al carico di rottura della linea stessa e successivamente vanno verificate le tensioni ai fairleads dello scafo (tensioni scambiate tra sistema di ormeggio e scafo) e le tensioni all'ancora.

In maniera simile si passa al dimensionamento dello scafo. Tale dimensionamento nel caso di natante in acciaio si basa su formule semi-empiriche per il dimensionamento dello spessore della lamiera. Una volta quindi definita una geometria l'algoritmo di ottimizzazione agisce sui parametri (definiti parametri liberi) per ottenere delle caratteristiche che siano ottime considerando il dimensionamento e la produttività stessa della macchina. Una volta definito il dispositivo e la sua capacità produttiva, viene ampliata l'analisi della macchina non solo considerando i fattori tecnici ma anche quelli economici. Si procede quindi alla definizione delle funzioni di costo per il calcolo dei costi del dispositivo e ultimare l'analisi tecno-economica. Si evidenzia che le funzioni di costo sono state ricavate in letteratura e da progetti simili pubblici con la finalità di ottenere un ordine di grandezza dei costi totali ma soprattutto individuare la suddivisione dei costi fra i vari sottosistemi.

Infine, vengono proposte delle tecnologie innovative per l'abbattimento del costo e per l'incremento della produttività come possibili sviluppi futuri di questa tecnologia.

3. Parametrizzazione e ottimizzazione del dispositivo

In questo paragrafo viene descritta la fase di ottimizzazione che ha portato alla definizione dei parametri di progetto preliminare del dispositivo PeWEC. Il tool di ottimizzazione del dispositivo e la sua parametrizzazione sono descritti in dettaglio nel documento "LA 1.12 – Sviluppo di algoritmi genetici" [1]. Come obiettivo di ottimizzazione sono stati scelti due parametri tecno-economici: il Capex over Productivity (CoP) e l'Annual Energy Production (AEP) in modo tale da poter individuare uno scafo che sia conveniente da un punto di vista del costo dell'energia e con una soddisfacente capacità di produzione elettrica. Il Capex definito nel documento LA 1.12 [1] descrive in maniera semplificata il costo associato al dispositivo, dove vengono considerate le funzioni di costo relative allo scafo, al pendolo e al generatore più ausiliari elettrici; tutti parametri che influenzano l'ottimizzazione del dispositivo.

Rispetto alla parametrizzazione del dispositivo descritta nel documento LA 1.12 è stata modificata la posizione dell'unità del pendolo. Ora l'unità pendolare può superare il livello della coperta in modo da aumentare la distanza fra la cerniera del pendolo e il centro di gravità (CoG) del dispositivo. Questo perché le coppie inerziali fra scafo e pendolo dipendono fortemente da questo parametro e portano ad aumentare le prestazioni del sistema.

Perciò la parametrizzazione dell'ingombro della unità del pendolo è stata modificata e nella nuova ottimizzazione l'ingombro può superare l'altezza della coperta di un certo valore massimo chiamato $unit_{shift}$:

$$Unit_{shift} = \frac{\tan(\alpha_{shift}) L_{hull}}{2}$$

Dove L_{hull} è la lunghezza dello scafo e $\alpha_{shift} = 13 \text{ deg}$.

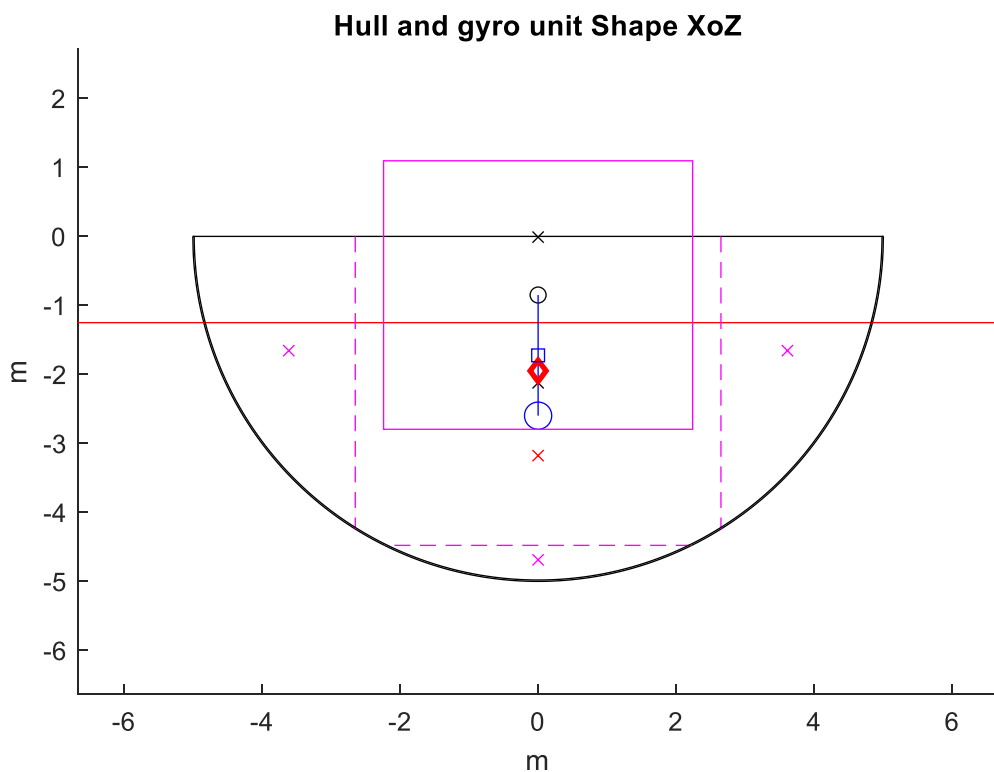


Figura 1 Esempio della nuova parametrizzazione degli ingombri dello scafo per l'ottimizzazione finale. L'ingombro del pendolo ora può superare la linea della coperta al fine di incrementare la distanza tra il fulcro del pendolo e CoG del dispositivo.

Il sito di riferimento per l'ottimizzazione è Pantelleria e in Tabella 1 è riportato lo spazio dei parametri per l'ottimizzazione; invece, la Tabella 2 riporta il set dei pesi delle ottimizzazioni condotte al fine di individuare il fronte di pareto fra gli indicatori tecno-economici CoP e AEP.

Tabella 1 Spazio dei parametri relativi all'ottimizzazione finale.

Parametro	Simbolo	Unità	Limite inferiore	Limite superiore	Passo
Lunghezza scafo	L	m	12	25	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	β_U	-	5%	40%	2.5%
Fattore forma pendolo	σ_P	-	1	10	1
Fattore lunghezza pendolo	γ_P	-	0.1	1	0.1
Numero unità pendolo	n_P	-	1	6	1
Fattore posizione pendolo	λ_P	-	1	10	1
PTO ID	PTO_{ID}	-	4	12	1
Rapporto riduzione	τ	-	10	30	5

Tabella 2 Set di pesi dell'ottimizzazione finale.

Set dei pesi ID	CoP-weight (w1)	AEP-weight (w2)
(1)	1	0
(2)	0.5	0.5
(3)	0	1
(4)	0.75	0.25
(5)	0.25	0.75

3.1. Risultati dell'ottimizzazione finale CoP/AEP relativi a Pantelleria

In questa sezione vengono riportati i risultati dell'ottimizzazione finale multiobiettivo CoP/AEP relativo al sito di Pantelleria per l'individuazione del dispositivo ottimo. Questi risultati sono stati calcolati considerando delle funzioni di costo semplificate per quanto riguarda lo scafo, l'unità pendolo e generatore elettrico più elettronica di potenza. Nella sezione 10 viene invece descritta la nuova funzione di costo dettagliata per la stima più attendibile dei costi del sistema PeWEC. La Figura 2 mostra il fronte di Pareto individuato dall'ottimizzazione con i seguenti estremi di ottimo:

- CoP ottimo 596 Euro/MWh, con valore corrispondente di AEP pari a 54.5 MWh/y
- AEP ottimo 191 MWh/y, con un valore corrispondente di CoP pari a 1492 Euro/MWh

Si può concludere quindi che gli obiettivi tecno-economici CoP e AEP siano conflittuali fra di loro e quindi l'ottimo dell'uno con corrisponde all'ottimo dell'altro. Per completezza dalla Figura 3 alla Figura 8 vengono riportati tutti i parametri di interesse delle macchine ottimali dal punto di vista del Pareto e riferite al grafico di Figura 2. Si possono quindi evidenziare delle tendenze preliminari che potranno essere utili per valutazioni future:

- L'AEP aumenta con la massa dislocata. Quindi per ottenere dispositivi più produttivi è necessario aumentare la massa dell'intero sistema. Questo fatto, portato al limite, può creare problemi di realizzabilità, trasporto e installazione del prototipo. Inoltre, all'aumentare della massa si avranno carichi maggiori sul sistema d'ormeggio e un costo maggiore.
- Le dimensioni fuori tutto del dispositivo aumentano all'aumentare dell'AEP. Dispositivi di dimensioni importanti portano a costi aggiuntivi durante il processo di realizzazione (minore disponibilità di bacini di carenaggio adatti per queste dimensioni ad esempio). Maggiori dimensioni causano anche maggiori forze causate da onde e correnti sul dispositivo e quindi condizioni sfavorevoli per la progettazione dell'ormeggio.
- All'aumentare dell'AEP corrisponde un aumento della massa dei singoli pendoli, del numero dei pendoli e della potenza installata complessiva dei generatori

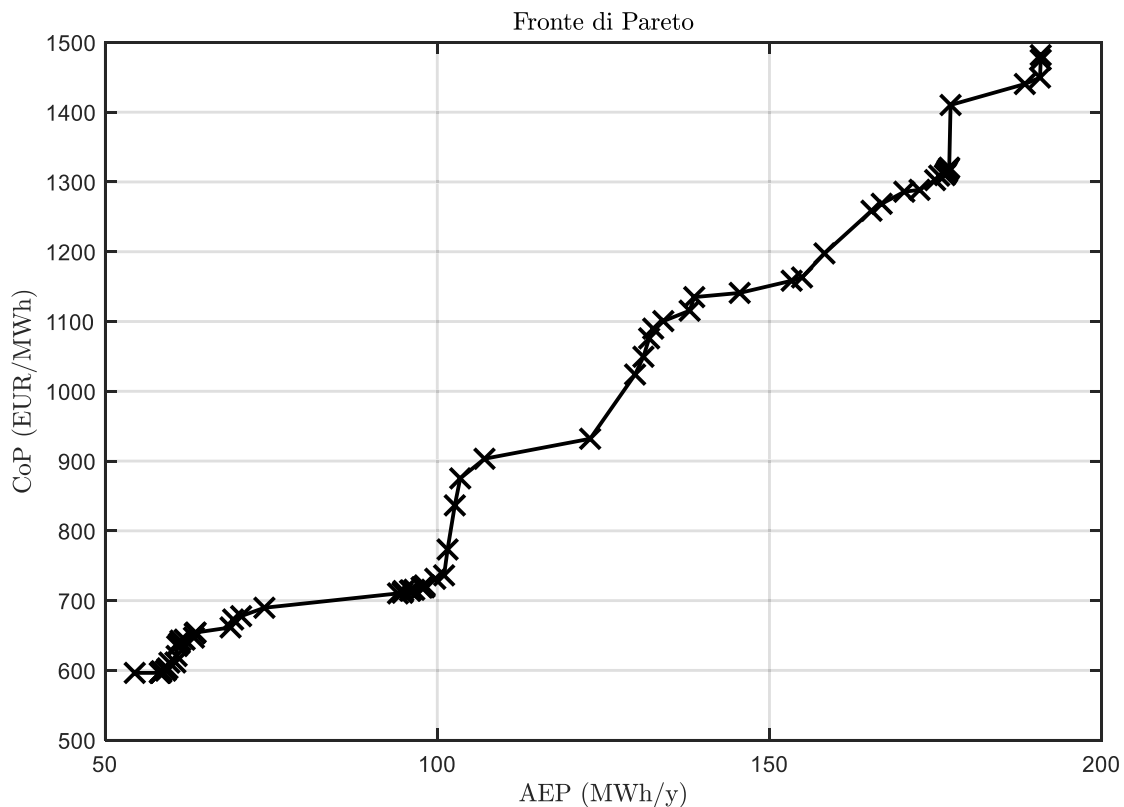


Figura 2 Fronte di Pareto CoP/AEP relativo all'ottimizzazione finale su Pantelleria.

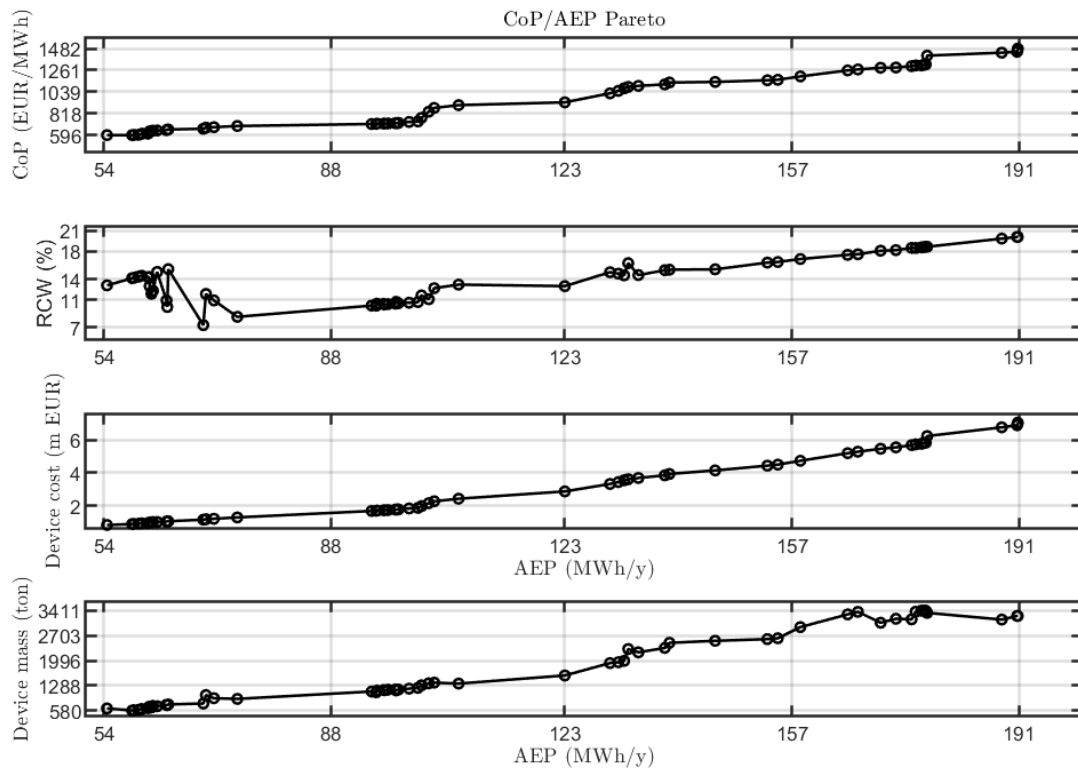


Figura 3 Parametri relativi ai dispositivi appartenenti al fronte di Pareto: CoP, RCW (Relative Capture Width), Costo e massa complessiva del dispositivo.

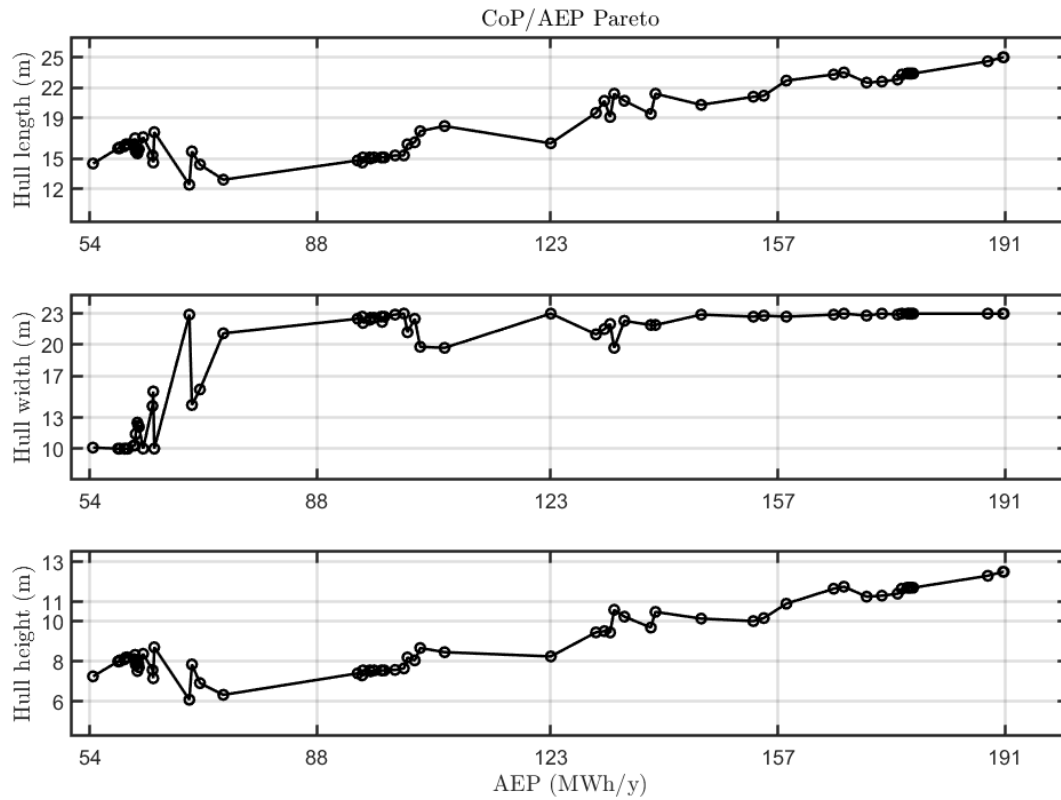


Figura 4 Parametri relativi ai dispositivi appartenenti al fronte di Pareto: lunghezza, larghezza e altezza dello scafo.

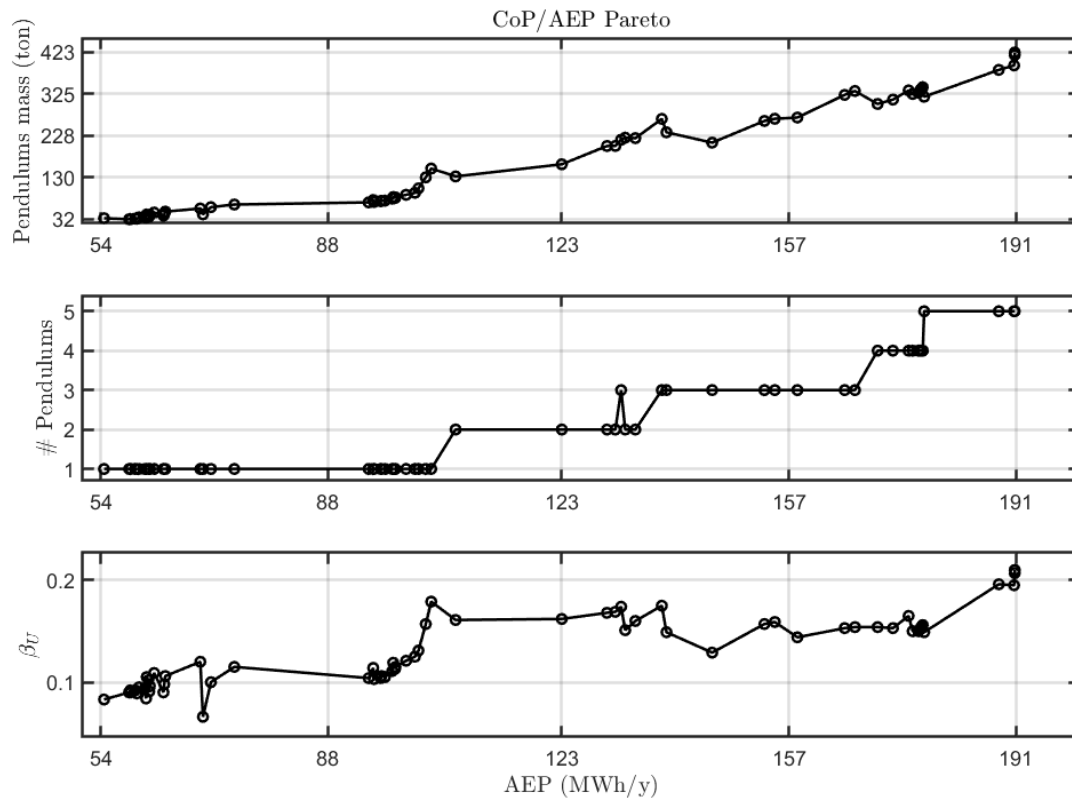


Figura 5 Parametri relativi ai dispositivi appartenenti al fronte di Pareto: massa complessiva del pendolo. Numero di unità pendolari, coefficiente di forma del pendolo.

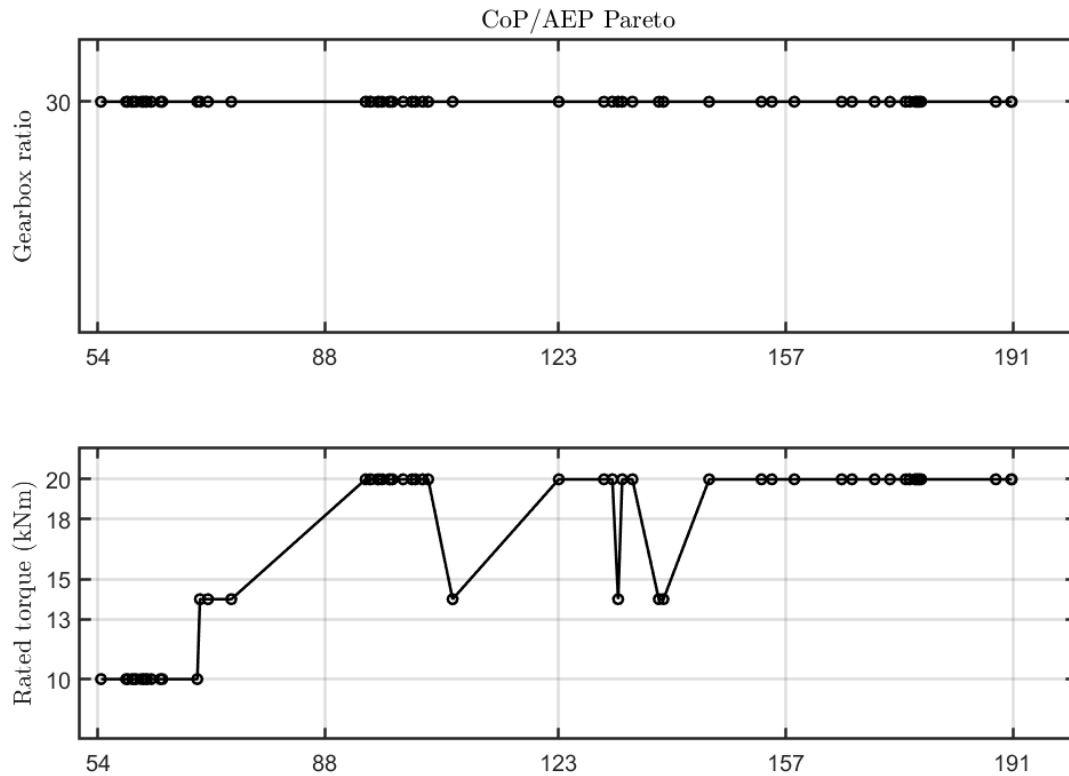


Figura 6 Parametri relativi ai dispositivi appartenenti al fronte di Pareto: rapporto di riduzione del riduttore, coppia nominale del generatore elettrico.

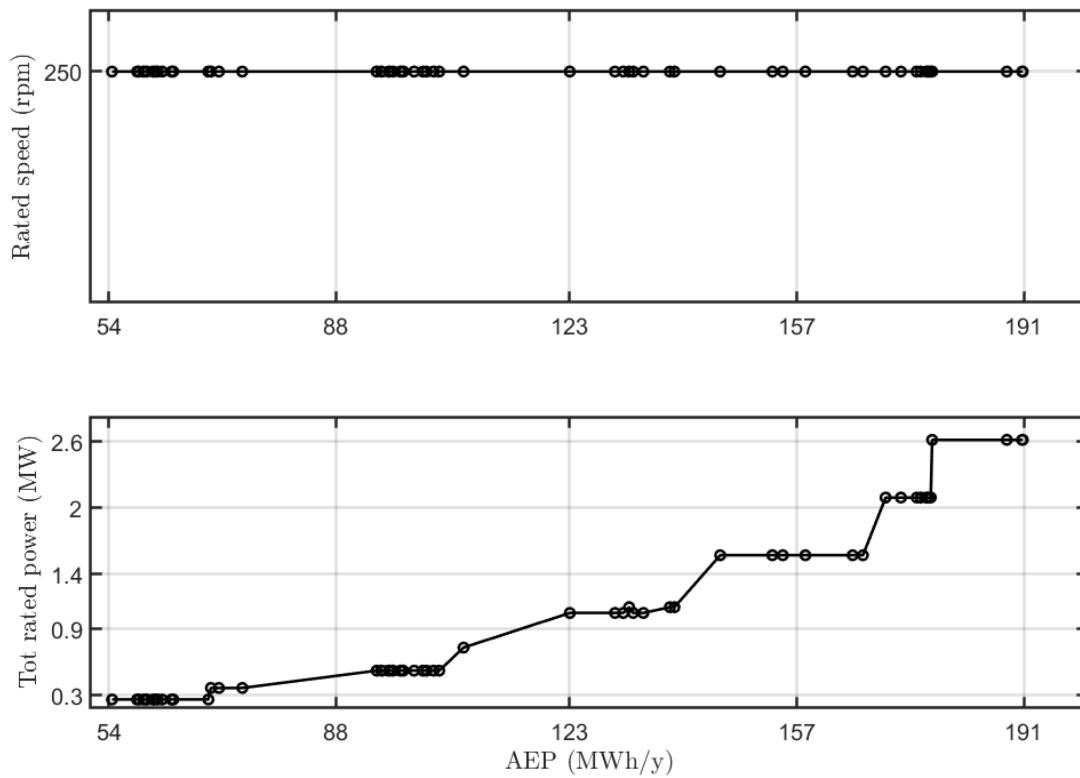


Figura 7 Parametri relativi ai dispositivi appartenenti al fronte di Pareto: velocità nominale del generatore elettrico, Potenza nominale complessiva dei generatori elettrici a bordo.

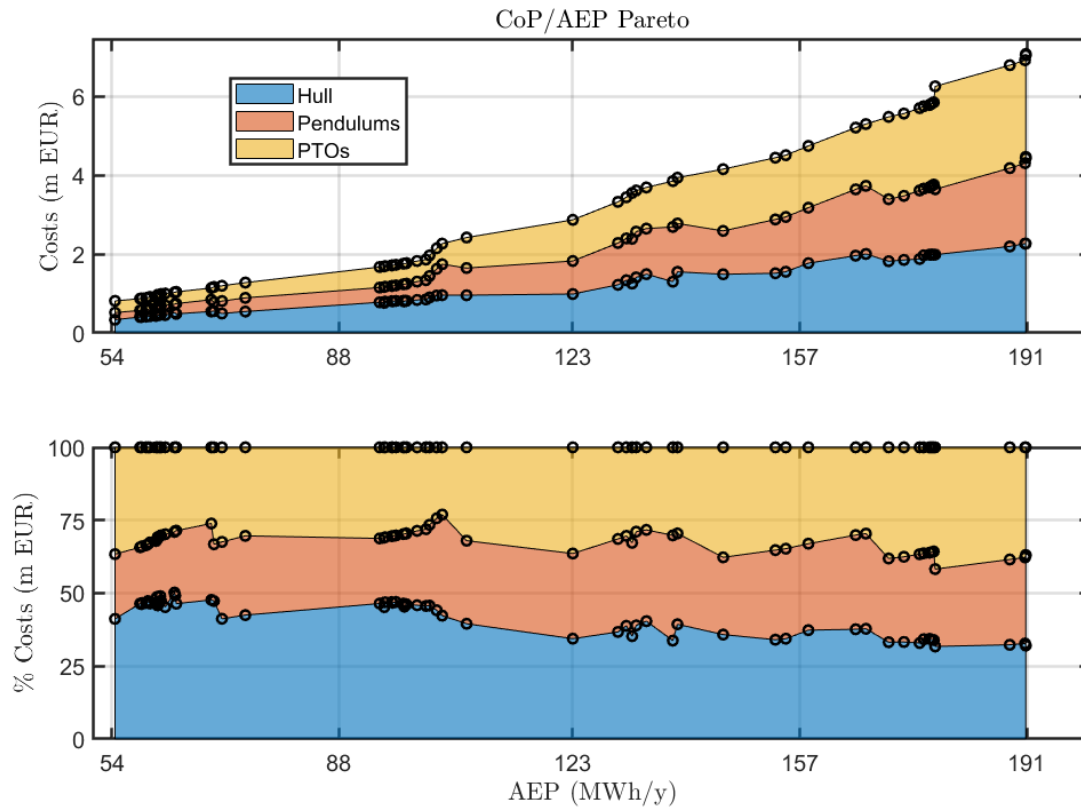


Figura 8 Parametri relativi ai dispositivi appartenenti al fronte di Pareto: suddivisione dei costi assoluti e relativi fra dei vari sistemi.

4. Caratteristiche scafo ottimale

Nella precedente sezione è stata descritta la procedura di ottimizzazione multi-obiettivo del dispositivo PeWEC dove gli obiettivi di ottimizzazione sono gli indicatori tecno-economici CoP e AEP. Sono stati analizzati i trend dei parametri dei dispositivi ottimali evidenziando le possibili problematiche. Lo scafo considerato ottimale è stato selezionato all'interno di questo gruppo di dispositivi cercando una via di mezzo fra una soddisfacente produttività del prototipo senza però distanziarsi troppo dalla zona ottimale del costo dell'energia. Durante la scelta del dispositivo ottimale sono state prese in considerazione anche fattori quali la realizzabilità del dispositivo in base all'esperienza pregressa del gruppo di ricerca in fatto di realizzazione di prototipi al vero. Qui di seguito vengono riportati i parametri liberi che descrivono univocamente il dispositivo:

Tabella 3 Parametri ottimi del dispositivo PeWEC ottimale.

Parametro	Simbolo	Unità	Valore
Lunghezza scafo	L	m	14.8
Larghezza scafo	W	m	22.5
Fattore forma scafo	h	-	0.63
Fattore altezza scafo	k	-	1
Affondamento	j	-	0.65
Distribuzione zavorre	BFR		0.54
Fattore massa pendolo	β_U	-	0.104
Fattore forma pendolo	σ_P	-	10
Fattore lunghezza pendolo	γ_P	-	0.96

Numero unità pendolo	n_p	-	1
Fattore posizione pendolo	λ_p	-	10
PTO ID	PTO_{ID}	-	6
Rapporto riduzione	τ	-	30

Le proprietà geometriche e inerziali complessive del dispositivo sono espresse invece Tabella 4. Il Centro di gravità è espresso in un sistema di riferimento centrato sullo scafo con origine sulla linea d'acqua (vedi Figura 1).

Tabella 4 - Proprietà geometriche ed inerziali dello scafo.

Proprietà	Valore	Unità di misura
Lunghezza	14.8	m
Altezza	7.4	m
Larghezza	22.5	m
Pescaggio	4.81	m
Coordinate CoG	[0 0 -1.0318]	m
Massa strutturale scafo	221.8	ton
Massa totale zavorre	803	ton
Massa dislocata	1118	ton
Ixx	55354173	kg*m ²
Iyy	29978074	kg*m ²
Izz	72150647	kg*m ²
Periodo di risonanza dispositivo	6.07	s

Le caratteristiche geometriche ed inerziali del pendolo e del generatore elettrico sono riportate di seguito in Tabella 5.

Tabella 5 - Proprietà del'unità di conversione pendolo

Proprietà	Valore	Unità di misura
Massa cilindro pendolo	71.7	ton
Lunghezza asta pendolo	2.4	m
Diametro pendolo	0.756	m
Larghezza pendolo	20.5	m
Distanza cerniera pendolo da CoG prototipo	2.444	m

Stima massa unità pendolo	93	ton
Rigidezza pendolo	1.6881e+06	Nm/rad
Inerzia pendolo attorno a cerniera	418000	kg.m ²
Periodo di risonanza	3.13	s
Rapporto di riduzione del riduttore	30	-
Velocità nominale generatore	250	rpm
Coppia nominale generatore		Nm
Potenza nominale generatore	523	kW

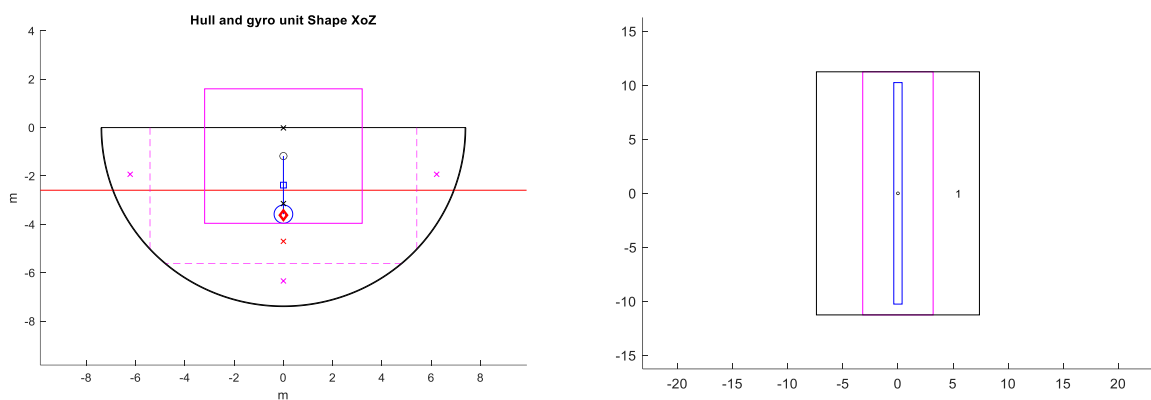


Figura 9 Vista laterale e in pianta del dispositivo ottimale PeWEC, dove vengono evidenziati gli ingombri dei sottosistemi più rilevanti, scafo, zavorre (ipotizzate costituite da sabbia), e pendolo con suo ingombro di rotazione attorno al proprio asse.

In Figura 9 sono invece riportate le viste in profilo e in pianta del dispositivo in forma schematica con gli ingombri di massima dei vari sottosistemi scafo, zavorre e pendolo così come sono descritti all'interno del tool di ottimizzazione. Le percentuali di distribuzione delle masse sono così definite:

- 71.7% zavorra (803 ton)
- 20% scafo (222 ton)
- 8.3% unità pendolo (93 ton)

In Figura 10 vengono riportate in funzione del periodo dell'onda la risposta idrodinamica del dispositivo per i gradi di libertà di interesse surge, pitch e heave. Si può notare come l'ottimizzatore abbia portato ad uno scafo di geometria semicircolare per ridurre lo smorzamento legato al termine lineare (radiation damping). Inoltre, in corrispondenza della risonanza a beccheggio si ha anche la risonanza nel grado di libertà di avanzamento, in quanto entrambi i gradi di libertà eccitano il moto di pendolamento del pendolo.

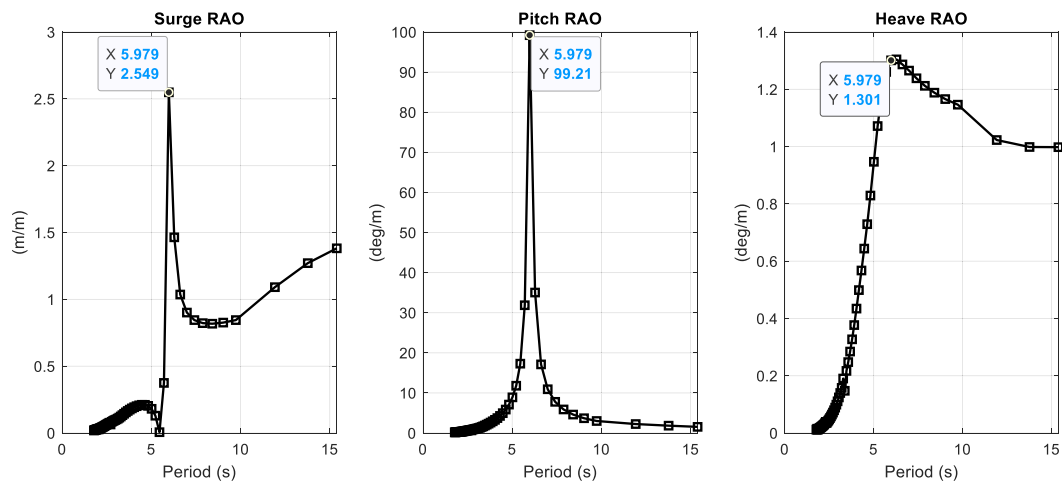


Figura 10 Risposta idrodinamica dello scafo (RAO) per i gradi di libert  di interesse Surge, Pitch e Heave.

4.1. Prestazioni del dispositivo ottimo nei siti Mediterranei

In questa sezione vengono descritte le prestazioni del dispositivo ottimale PeWEC nei siti di interesse analizzati durante il progetto. La geolocalizzazione dei siti in analisi   mostrata in Figura 11. Durante l'attivit  di progetto 1.4 [2] sono stati analizzati i dati meteorologici forniti dai modelli ad alta risoluzione di ENEA le cui propriet  salienti in termini di densit  di potenza sono riassunte in Figura 12.

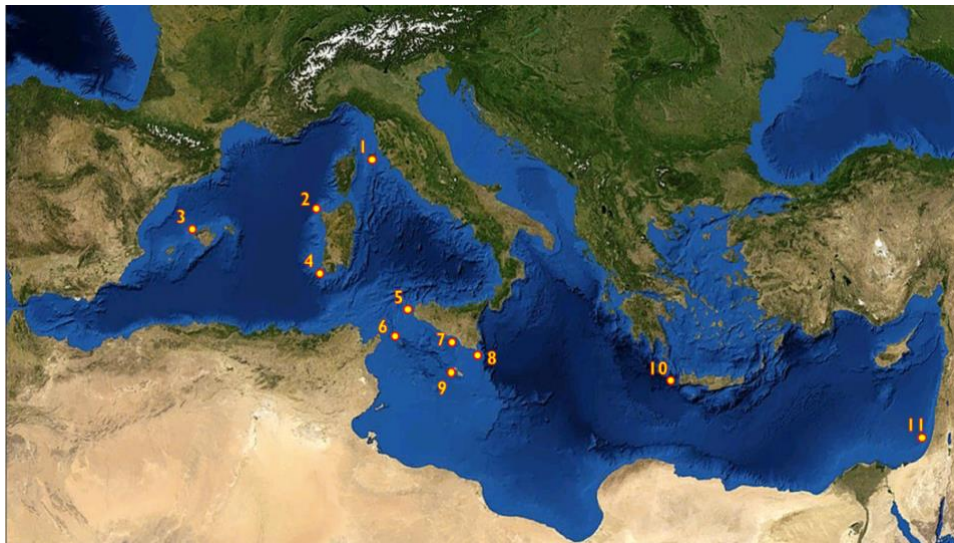


Figura 11 Siti mediterranei analizzati durante il Progetto.

Power density kW/m							
Anno	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2014 - 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

Figura 12 Densità di Potenza dei siti analizzati durante il Progetto in funzione dell'anno di analisi e media dei diversi anni.

Le prestazioni dei dispositivi presentati nella precedente sezione in termini di AEP sono state ricavate da un modello del sistema linearizzato (Frequency domain model) in quanto adatto per questioni di tempo calcolo per essere inserito in un ottimizzatore globale (per maggiori dettagli fare riferimento al documento LA-1.12 [1]). Per una valutazione più precisa della produttività del dispositivo è necessaria una modellazione non lineare del sistema, includendo quindi le non linearità della dinamica del pendolo e del Power take Off (saturazione in coppia e potenza e velocità limitata per motivi di sicurezza elettrica). Per questa valutazione è stato quindi adottato un modello non lineare, precedentemente validato tramite prove sperimentali durante un progetto precedente sul sistema PeWEC (Accordo di programma MISE-ENEA, [3], [4]). Al momento la dinamica del sistema non include l'effetto dell'ormeggio sulla dinamica del sistema, e condizioni di mare reale multidirezionale (spreading onda); queste funzionalità sono in fase di implementazione e verranno valutate in futuro. Il controllo adottato è del tipo reattivo frequentemente adottato in letteratura, dove per ogni stato di mare i parametri di controllo smorzamento e rigidità del PTO c_{PTO} e k_{PTO} vengono ottimizzati al fine di massimizzare l'energia prodotta e garantendo un certo livello dei carichi sul sistema e velocità massime del generatore elettrico.

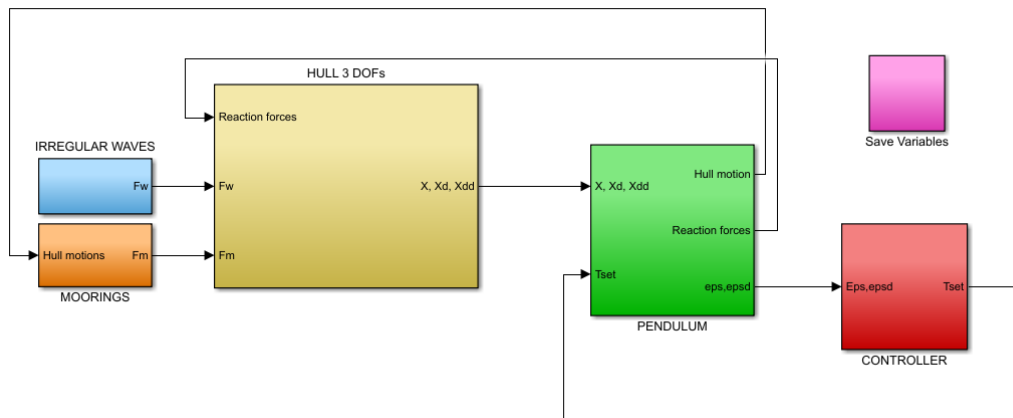


Figura 13 Modello Matlab/Simulink della dinamica non-lineare del sistema PeWEC.

I risultati di queste simulazioni e valutazione delle prestazioni è sintetizzato in Tabella 6 dove vengono riportate le produttività lorde e nette per i vari siti in analisi. I valori sono stati calcolati riferendosi al diagramma delle occorrenze medie degli anni in analisi (2014-2019).

Tabella 6 Produttività del dispositivo PeWEC per i vari siti in analisi.

Site Name	Site Power	Net productivity	Gross productivity
	Density (kW/m)	(MWh/y)	(MWh/y)
P01_Isola_D_Elba	0.974	18	23.5
P02_N_O_Sardegna	7.2	74.5	93.6

P03_N_Baleari	1.88	27.7	35.8
P04_S_O_Sardegna	5.46	50	63.2
P05_N_O_Sicilia	2.95	43.8	56.4
P06_Pantelleria	4.7	73.8	93.2
P07_S_O_Sicilia	2.3	45.4	58.3
P08_S_Sicilia	2.89	51.2	65.6
P09_Malta	4.7	75.6	95.17
P10_O_Creta	3.7	57.9	74.1
P11_Israele	2.15	30.9	41.6

4.2. Prestazioni del dispositivo ottimo a Pantelleria

Come sito di riferimento per il progetto è stata scelta l'isola di Pantelleria per la forte predisposizione all'installazione di energia rinnovabili da onde del mare e per le sue caratteristiche meteomarine. L'ottimizzazione del dispositivo, infatti, è stata condotta considerando l'isola di Pantelleria e in questo paragrafo vengono mostrati i risultati relativi a questo sito di riferimento. In Figura 14 sono riportate per completezza il diagramma delle occorrenze e dell'energia riferite al sito di Pantelleria per il periodo complessivo 2014-2019 (per maggiori dettagli consultare il report LA 1.4 [2]). La Figura 15 invece riporta gli stati di mare simulati dal modello numerico rappresentati da marker rossi confrontati con il diagramma dell'energia, per evidenziare come gli stati di mare simulati siano rappresentativi delle caratteristiche meteomarine del sito.

In Figura 16, Figura 17 e Figura 18 vengono riportati rispettivamente gli andamenti della potenza netta, energia prodotta e RCW della macchina ottima. La potenza netta e RCW sono caratteristiche intrinseche del dispositivo e indicano la capacità di generare potenza dalla macchina e l'efficienza di conversione dell'energia ondosa vista come potenza dell'onda incidenza per la potenza prodotta dal generatore elettrico. Invece il diagramma di energia prodotta dalla macchina è funzione anche delle caratteristiche meteomarine del sito e si nota come per il sito di Pantelleria la zona di funzionamento e produzione è compreso nel range di periodi 4-8 s. In Figura 19 viene riportato il capacity factor (CF) e la produttività del dispositivo in funzione della taglia di potenza (rated power). La taglia di potenza, e quindi il capacity factor, sono dati rilevanti per il successivo dimensionamento del network elettrico e ne influenzano i costi. In appendice vengono invece riportati altri grafici di simulazione come i valori dei parametri ottimi del controllo.

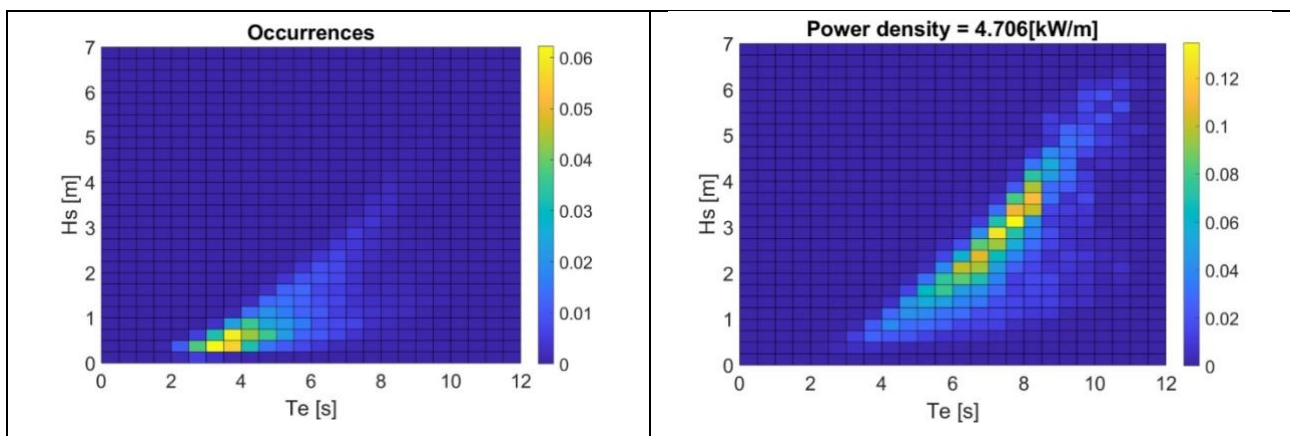


Figura 14 A sinistra diagramma delle occorrenze, a destra diagramma dell'energia (MWh/m) riferite al sito di Pantelleria (2014-2019).

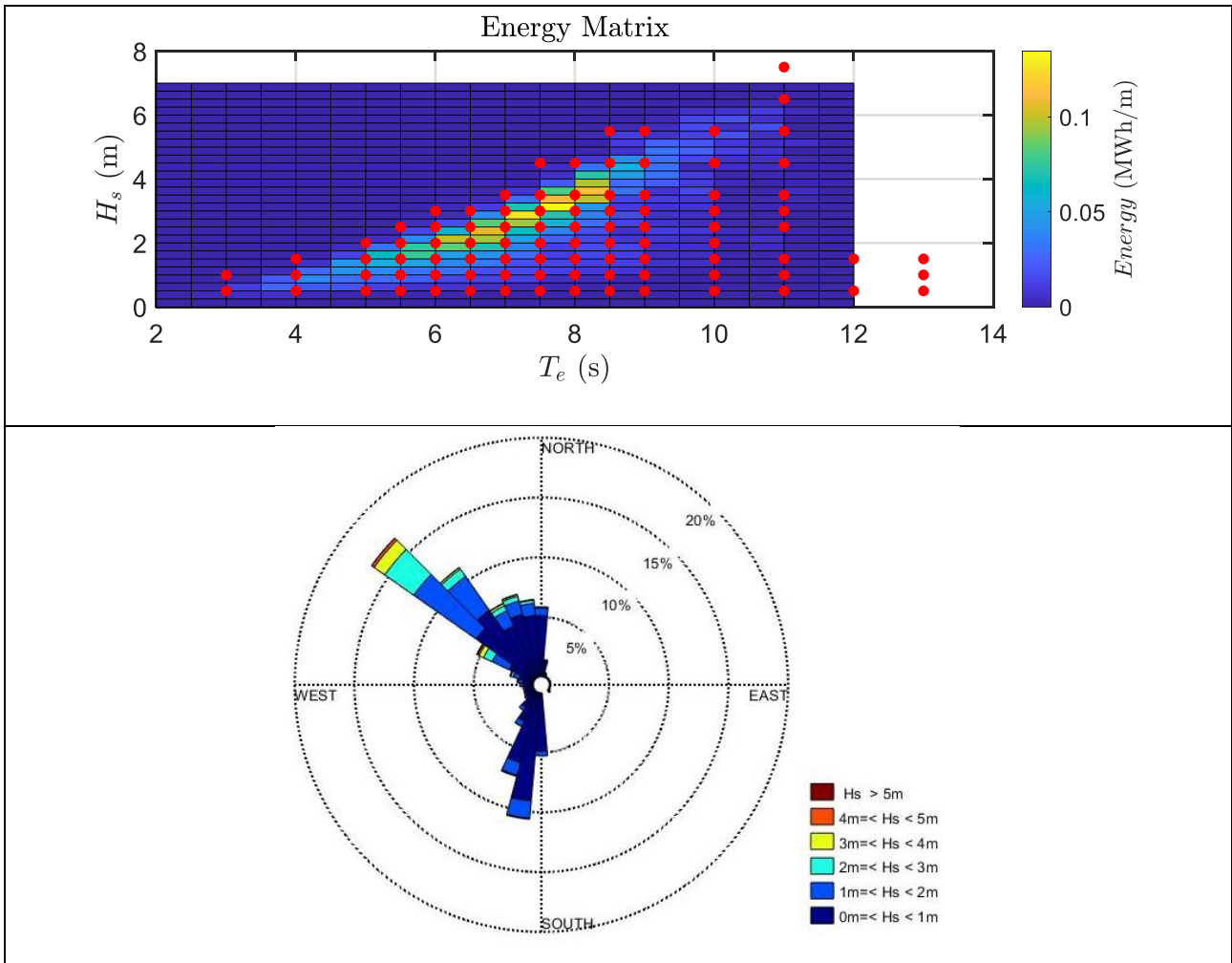


Figura 15 In alto gli stati di mare simulati rappresentate da marker rossi confrontati con la scatter dell'energia di Pantelleria (2014-2019). In basso è raffigurata la rosa delle onde per l'altezza significative.

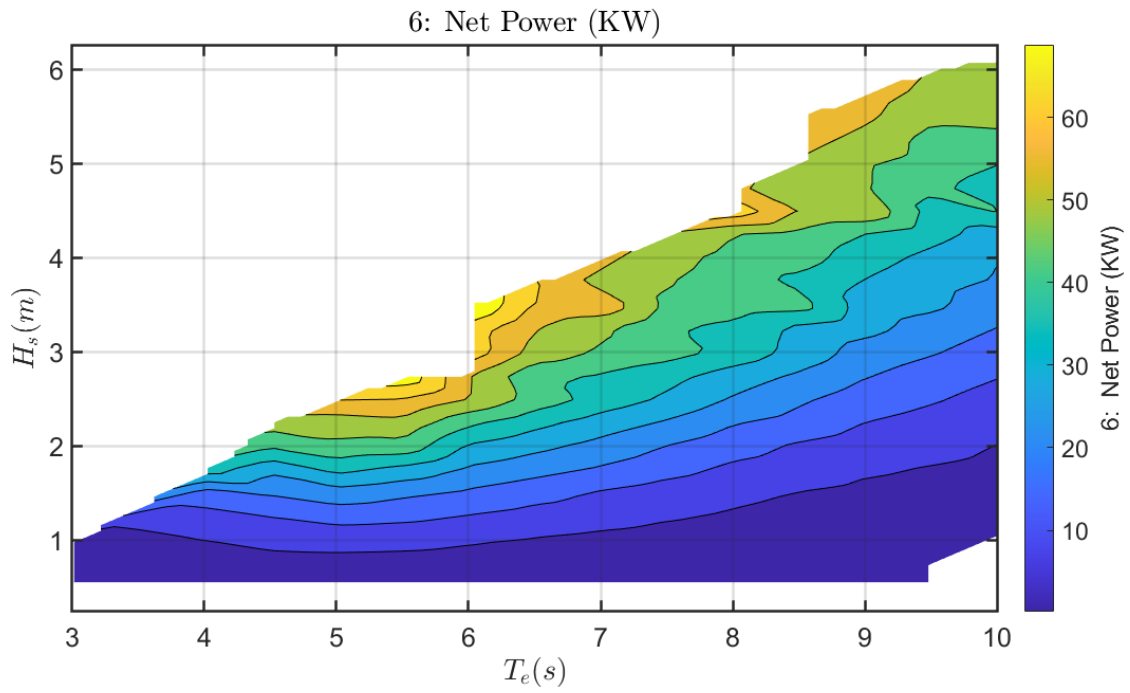


Figura 16 Andamento della potenza netta prodotta dal dispositivo ottimo.

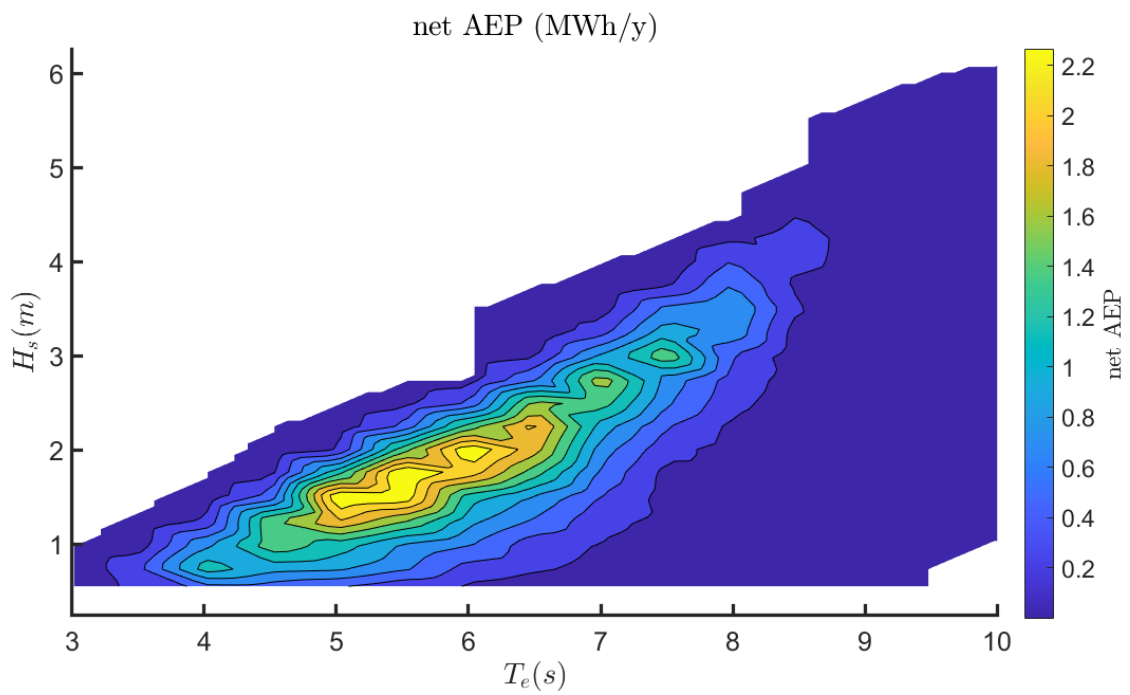


Figura 17 Andamento della produttività del dispositivo ottimo riferito al sito di Pantelleria.

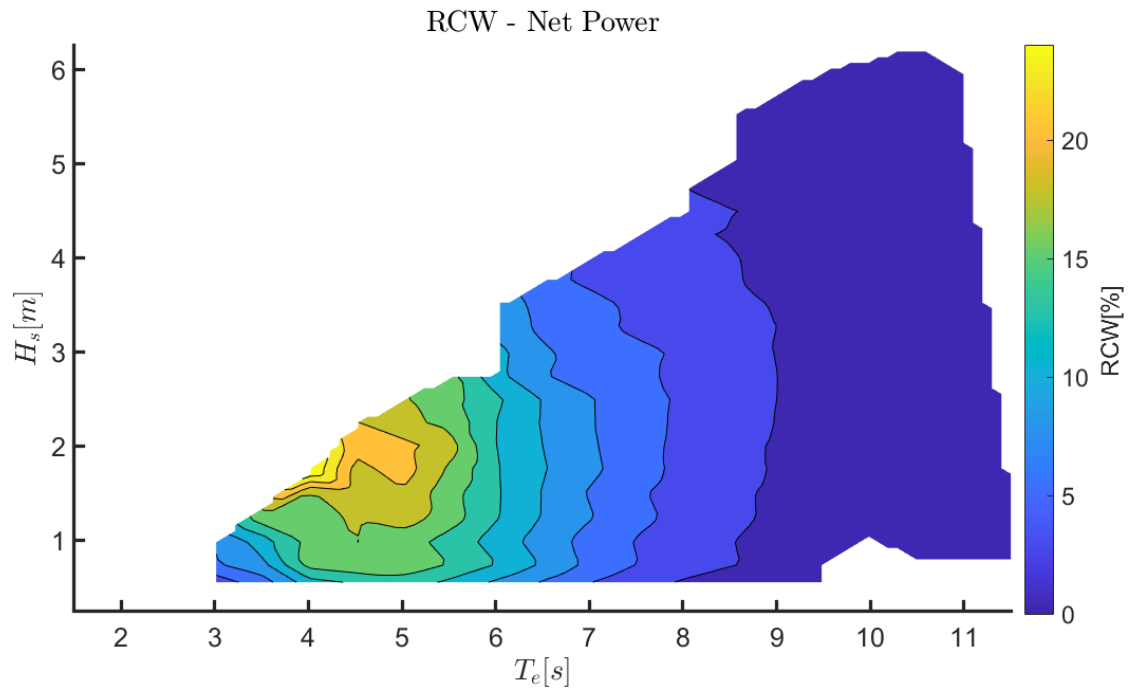


Figura 18 Andamento del Relative Capture Width (RCW) del dispositivo ottimo.

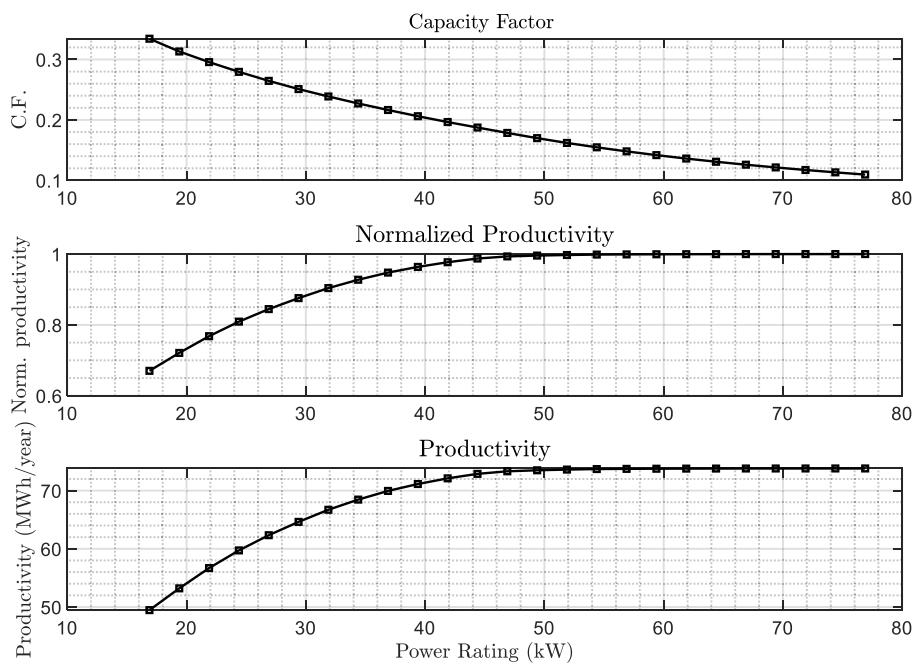


Figura 19 Andamento della produttività e Capacity Factor (CF) della macchina ottima al variare della potenza di taglia del dispositivo (Power rating).

5. Sistemi di controllo avanzati

In questo capitolo sono analizzate e sviluppate le due strategie di controllo avanzate che sono state presentate nel documento LA1.6 [5]: una strategia di controllo data-driven (basata sull'ausilio di reti neurali e random forest) e una model-based di tipo predittivo (model predictive control). Il dispositivo che è stato considerato come caso di applicazione è quello ottimizzato nei capitoli precedenti, e il sito di riferimento è quello di Pantelleria.

5.1. Strategia di controllo data-driven: reti neurali e random forest

La strategia di controllo di tipo data-driven, proposta e analizzata nel documento LA1.6 [5], si basa sul concetto di costruzione per apprendimento di un metamodelllo e ottimizzazione dell'azione di controllo da applicare per mezzo dello stesso.

In questo sistema di controllo, la coppia applicata dal PTO segue la stessa relazione tipica del controllo reattivo:

$$T_{PTO} = c\dot{\varepsilon} + k\varepsilon$$

La stessa coppia di parametri di controllo è applicata per l'intera durata dello stato di mare in cui il sistema PeWEC è posto. Tuttavia, a differenza di quanto presentato dalla soluzione tradizionale, i parametri c e k risultano essere definiti interamente dal processo di apprendimento e dall'ottimizzazione svolta attraverso il metamodelllo.

La scelta dell'azione a (corrispondente in questo caso alla coppia di parametri di damping c e stiffness k) da applicare è regolata da una strategia di apprendimento in grado di gestire i processi di esplorazione e ottimizzazione. Il primo processo, fondamentale nella prima fase di apprendimento, genera un'azione a mirata ad esplorare lo spazio delle azioni possibili in un determinato stato di mare. Il secondo processo invece, attivo principalmente in un secondo momento in cui il controllo ha ottenuto una conoscenza sufficientemente precisa del sistema, mira ad assorbire la massima quantità di energia.

Un metamodelllo è uno strumento matematico utilizzato per relazionare i dati di tipo informativo che il sistema ha a disposizione e l'azione di controllo con una funzione che misuri la performance del sistema (in questo caso, l'assorbimento di potenza). I dati di tipo informativo sono i dati su cui il sistema di controllo non può agire e che pertanto non sono influenzati da esso. In questo contesto essi sono dati dai parametri spettrali d'onda T_e ed H_s . Essi, infatti, non sono influenzati dall'azione del controllo del sistema ma sono imposti dall'ambiente sull'agente. Nelle sezioni seguenti, differenti tipi di metamodelli e di metodologie di trattamento dei dati verranno analizzate per definire la migliore da applicare all'interno della strategia proposta.

Il processo di sviluppo della strategia di controllo, pertanto, può essere suddiviso in:

1. Scelta dello strumento matematico migliore da utilizzare come metamodelllo e dei suoi input.
2. Definizione di una strategia di apprendimento capace di gestire nel tempo i processi di esplorazione ed ottimizzazione e le relative finalità contrastanti.

I vantaggi di questo tipo di strategia possono essere sintetizzati come:

- Indipendenza dal modello di sistema: la strategia di controllo dipende solo dai dati provenienti dal sistema reale e quindi non è affetta dalle incertezze generate in fase di creazione del modello.
- Possibilità di definizione di una strategia di apprendimento capace di aggiornare il sistema ed adattarlo al processo di usura ed invecchiamento dell'impianto.

5.2. Definizione della struttura del metamodelllo

Come detto in precedenza, il metamodelllo è lo strumento capace di relazionare i dati di azione (c e k) e di stato (T_e ed H_s) con una funzione di performance dell'azione di controllo. Nella strategia di controllo proposta si è deciso di definire la performance dell'azione di controllo come la potenza media assorbita durante il periodo di tempo in cui la coppia di parametri di azione c e k è stata applicata. Si può vedere pertanto il metamodelllo come lo strumento per descrivere la

potenza media assorbita dal PeWEC quando in uno stato di mare T_e , H_s si applica un controllo definito dall'azione c, k per un periodo di tempo T .

$$\hat{P}_{abs} = \mathcal{M}(T_e, H_s, c, k) = \mathcal{M}(s, a)$$

Il metamodello è pertanto depositario della conoscenza che la strategia di controllo ha acquisito sul sistema e l'ambiente durante il processo di apprendimento. È importante sottolineare come questa funzione non possa semplicemente essere svolta da uno strumento quale le funzioni spline. È necessario, infatti, vista l'ampiezza dello spazio degli stati, la loro durata e le loro occorrenze, che la "conoscenza" che il metamodello rappresenta venga diffusa anche negli stati di mare adiacenti. In questa maniera, un'esperienza data dalla combinazione di s ed a è condivisa con gli stati di mare con periodi energetici e altezze significative simili.

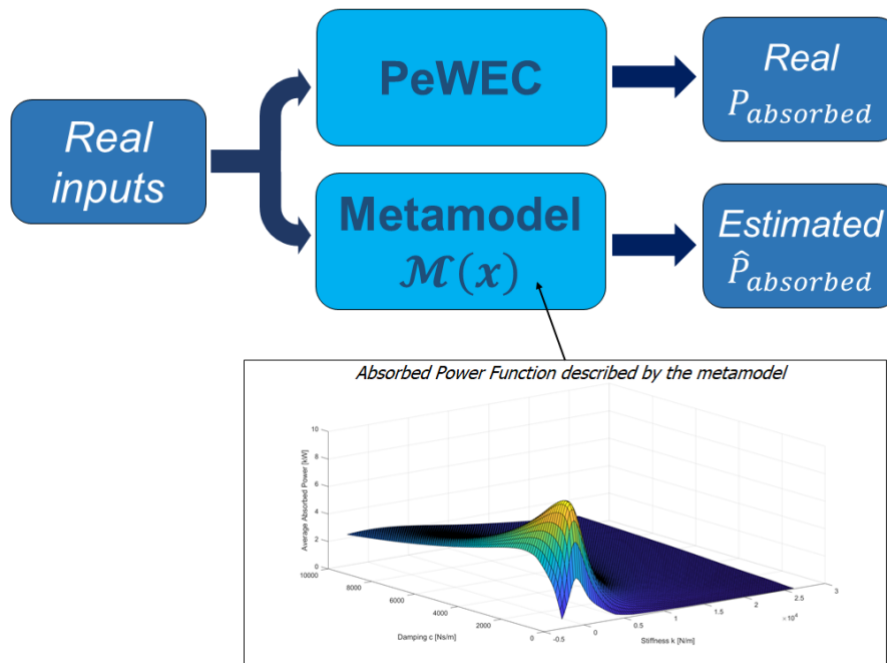


Figura 20 - Rappresentazione grafica del concetto di metamodello.

Per relazionare i dati reali misurati in input (T_e , H_s , c e k) con gli stessi in output (potenza media assorbita) le due soluzioni proposte in questa relazione sono gli alberi di regressione e le reti neurali. Questa scelta viene fatta considerando le potenzialità di descrizione della relazione che intercorre tra stato, azione e performance e valutando le conseguenze che la scelta di tali strumenti porta in fase di ottimizzazione del controllo.

5.2.1. Alberi di regressione e random forests

Gli alberi di regressione sono una particolare classe di alberi decisionali. Gli alberi decisionali sono uno dei più comuni approcci alla modellizzazione per le previsioni. Essi usano una semplice rappresentazione per collegare i dati in input con un'uscita predetta. Questa rappresentazione è composta da una struttura ad albero, in cui, a partire da delle condizioni in ingresso, una serie di diramazioni si diffondono, creando percorsi differenti a seconda dei valori in input. Ogni percorso termina con una zona di output predetto differente. Se gli output sono variabili target che possono prendere valori continui, l'albero decisionale è chiamato albero di regressione. Se l'output è invece un'etichetta, esso è chiamato albero di classificazione. Per la loro semplicità e la loro struttura facile da comprendere, sono tra gli approcci più utilizzati nel campo del machine learning, soprattutto nell'ambito del processo decisionale.

Le porzioni terminali dell'albero sono chiamate foglie o nodi terminali. Ogni nodo terminale corrisponde ad una porzione dello spazio di output, ed il valore nella foglia è la media dei dati di osservazione che cadono in quella parte dello spazio di output. I punti in cui i rami si dividono sono chiamati nodi interni.

Dal momento che, una volta svolto il processo di training, tutti i punti in input che cadono in una determinata condizione generano lo stesso output, la funzione che è generata dall'utilizzo di un albero di regressione è caratterizzata da molte discontinuità e zone a gradiente nullo. Per questo motivo è consigliabile, qualora si decida di utilizzare questo strumento come metamodello, associarlo a un algoritmo di ottimizzazione che non sia gradient-based. Un esempio potrebbe essere un algoritmo genetico.

Il processo di training degli alberi di regressione è basato sull'ottimizzazione degli iperspazi definiti dalle condizioni costituenti i nodi interni. Ad ogni step del processo di training, la diramazione capace di diminuire maggiormente l'errore tra output predetto e reale viene creata. Questo processo termina quando tutte le foglie hanno raggiunto una dimensione minima scelta in fase iniziale. Questo tipo di training, che ottimizza passo per passo e non globalmente, è veloce se paragonato ad altri processi di training, come ad esempio quello relativo ai pesi delle reti neurali. Il risultato, in termini di errore rispetto al comportamento dei punti reali è generalmente buono, e questa bontà aumenta con l'aumentare dei dati utilizzati per il training e con la loro dispersione.

Più alberi di regressione utilizzati assieme vanno a formare la cosiddetta "foresta" o random forest. Questo tipo di struttura di regressione e approssimazione è costituita da diverse sottostrutture (gli alberi) che sono esattamente costituiti come i singoli alberi di regressione descritti in precedenza. L'output di una random forest è costituito dalla media degli output dei singoli alberi che la costituiscono quando vengono forniti degli stessi input. La caratteristica che differenzia gli alberi delle foreste dai singoli alberi di regressione è data però dal fatto che gli alberi costituenti la foresta sono degli alberi "deboli". Il training di questi alberi, infatti, non è svolto nella stessa maniera per tutti gli alberi (poiché questo porterebbe ad avere alberi tutti uguali e quindi un risultato della foresta non dissimile dall'output del singolo albero), ma è svolto con un sottoinsieme del set di training totale della foresta. Inoltre, non tutti gli input della foresta costituiscono degli input del singolo albero. Questo, nel caso in cui gli input del metamodello random forest fossero di numero N , si traduce in un numero di input dei singoli alberi $M < N$. Quest'ultima caratteristica, qualora accoppiata con un'espansione del set di input data da input aggiuntivi ottenuti dalla combinazione degli input originali, aumenta la capacità della foresta di generalizzare il risultato di approssimazione e rendere il metamodello generato in questo modo meno suscettibile a eventuali rumori o variabilità dei dati misurati.

5.2.2. Reti neurali

Le reti neurali artificiali sono modelli computazionali con una struttura ispirata a considerazioni biologiche sul cervello animale. Sono costituite da una combinazione di entità di livello inferiore, i neuroni, collegati da pesi e in grado di rimodellare gli ingressi, restituendo un'uscita modificata, eventualmente, attraverso una relazione non lineare. Le loro due principali applicazioni sono la classificazione e l'approssimazione. Nell'utilizzo come metamodelli, le reti neurali sono sempre progettate con finalità di approssimazione e di regressione.

L'obiettivo delle reti neurali è quello di approssimare una funzione target. Questa funzione potrebbe essere una funzione da emulare o una politica di classificazione da attuare. Per questo motivo, la rete neurale può essere vista come una funzione $f(x, \theta)$, la quale ha lo scopo di approssimare una funzione target. Ad esempio, in una rete neurale classificatrice la configurazione ottimale di θ corrisponde a quella in grado di ridurre correttamente l'input x alla categoria corretta y . Mentre una rete neurale utilizzata in un contesto di approssimazione si dice che abbia una configurazione ottimale dei suoi parametri θ una volta che è in grado di riprodurre con il minimo errore la forma della funzione target. Il processo di ottimizzazione dei parametri è chiamato addestramento o training della rete, e consiste nell'associare, sulla base dei dati di training, i corretti pesi che collegano i vari neuroni della struttura.

Le reti neurali utilizzate per l'approssimazione sono uno strumento utile perché in grado di descrivere le non linearità, assicurando inoltre una continuità della funzione. Per questo motivo, se utilizzate come metamodelli esse permettono, in fase di ottimizzazione, di utilizzare anche algoritmi gradient-based più efficienti dal punto di vista computazionale. Tuttavia, esse presentano anche degli svantaggi:

- Il processo di training delle reti neurali è dato da un'ottimizzazione accoppiata al concetto di retropropagazione. Quest'ultimo si basa su diverse inversioni matriciali nei propri calcoli, rendendo l'addestramento un processo computazionalmente pesante e lungo (più lungo del processo di addestramento di un albero di regressione).

- Le reti neurali necessitano di un numero di dati sufficientemente alto, maggiore di quello richiesto dagli alberi di regressione.
- Il processo di training è suscettibile alle condizioni iniziali dei pesi che collegano i differenti neuroni. Per questo motivo, preso un dato set di training, è opportuno addestrare più volte una rete e prendere successivamente il risultato migliore.

5.2.3. Definizione del set di input del metamodello

Come anticipato nelle sezioni precedenti, oltre alla scelta dello strumento matematico utilizzato per approssimare il comportamento della funzione da ottimizzare, un'altra scelta fondamentale è quella del set di input dati al metamodello. Questo infatti (specialmente nel caso delle random forest in cui il set dei singoli alberi è differente) influenza notevolmente le capacità di generalizzazione che il singolo metamodello ha. In questo documento, ci riferiremo a due principali tipi di input:

- No additional features: in questo tipo di configurazione gli input del metamodello sono dati da T_e , H_s , C e K , senza alcun tipo di combinazione tra di essi.
- Additional features: in questa configurazione, oltre agli input della classe precedente, le seguenti combinazioni sono state aggiunte:
 - T_e^2
 - H_s^2
 - C^2
 - K^2
 - $T_e H_s$
 - $\log_{10}(T_e) \log_{10}(C)$
 - $\log_{10}(T_e) \log_{10}(K)$
 - $\log_{10}(H_s) \log_{10}(C)$
 - $\log_{10}(H_s) \log_{10}(K)$
 - $\log_{10}(K) \log_{10}(C)$
 - $\log_{10}(T_e)$
 - $\log_{10}(H_s)$
 - $\log_{10}(C)$
 - $\log_{10}(K)$

La scelta di adottare combinazioni logaritmiche è dovuta alla differenza tra gli ordini di grandezza che le variabili di damping e stiffness possono avere tra di loro e rispetto al periodo e all'altezza significativa. Viceversa, essendo sotto questo punto di vista comparabili, il periodo e l'altezza sono stati, nella loro combinazione, utilizzati senza alcun tipo di modifica.

5.2.4. Definizione della strategia di apprendimento

La fase successiva dello sviluppo del sistema di controllo data-driven proposto è la definizione della strategia di apprendimento. A differenza di un sistema di controllo ottimo di tipo model-based, infatti, i sistemi basati su apprendimento basano le proprie azioni di controllo su due finalità diverse e contrastanti:

- Costruzione di un metamodello capace di descrivere con precisione la funzione di performance in tutte le regioni di stato ed azione.
- Massimizzazione della performance (potenza media assorbita).

La strategia di apprendimento proposta si basa sul concetto di *greedy function*. Preso uno stato di mare e definita la quantità di esperienze affrontate in quello stato di mare, la greedy function descrive la probabilità che la prossima azione di controllo sia di tipo esplorativo.

Nello sviluppo della greedy function, si è deciso di utilizzare una funzione di tipo logistico:

$$\varepsilon(n_{Te,Hs}) = -\frac{a}{1 + e^{-b(n_{Te,Hs}-c)}} + d$$

Dove $n_{Te,Hs}$ è il numero di esperienze pregresse in un determinato stato definito dai parametri di altezza significativa e periodo energetico T_e e H_s , e $\varepsilon(n_{Te,Hs})$ è la probabilità di svolgere un'azione esplorativa in quel dato stato di mare. I parametri a , b , c , e d sono stati definiti in modo da garantire una fase esplorativa obbligatoria nella prima fase di apprendimento e una probabilità di svolgere ulteriori esplorazioni per aggiornare il metamodello una volta che una quantità sufficiente di esperienza è stata accumulata. La greedy function finale è rappresentata nella figura successiva.

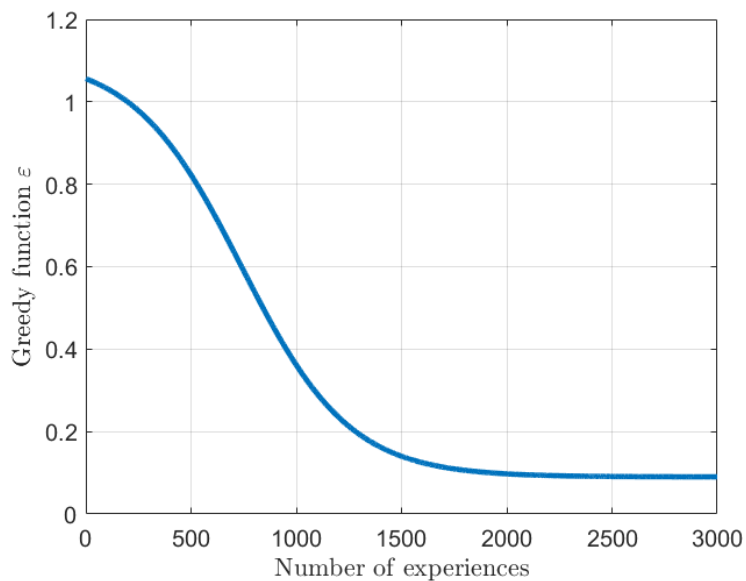


Figura 21 - Esempio di greedy function per strategie di apprendimento data-driven.

Come è possibile notare dall'esempio di greedy function presentato nell'immagine precedente, è opportuno, nelle prime esperienze che il sistema effettua in un dato stato di mare, assicurare un tipo di azione esplorativo, imponendo una probabilità maggiore del 100%. Viceversa, ottenuta una quantità di informazioni minime ad assicurare un'eventuale azione di controllo ottimizzata significativa, la probabilità di esplorazione scende e quella di ottimizzazione aumenta. Infine, per poter sopperire alle problematiche tipiche dei controlli model-based dovute all'usura dei sistemi, viene assicurata una probabilità di esplorazione minima anche a condizioni di conoscenza maggiori. Questa soluzione, per quanto pregiudichi un assorbimento di potenza ottimale, permette di continuare a perseguire la finalità di costruzione di un metamodello preciso. Il sistema, grazie a questa percentuale di esplorazione minima, è in grado di adattarsi ai cambiamenti dell'impianto, dovuti all'invecchiamento dell'impianto stesso e alle colture marine che potrebbero svilupparsi sul suo scafo. Con questo strumento, pertanto, nella strategia di controllo proposta, viene stabilito, una volta che lo stato di mare è mutato, che tipo di azione di controllo attuare fino al successivo cambiamento.

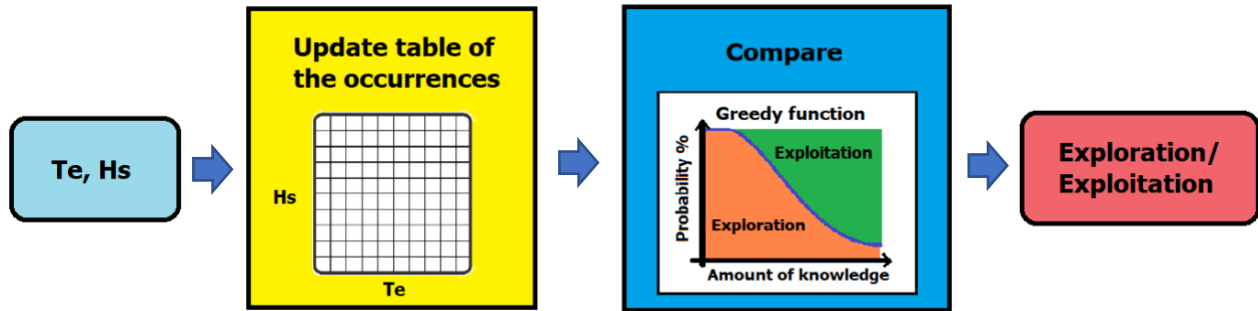


Figura 22 - Schema del funzionamento della scelta tra esplorazione e ottimizzazione nel processo di apprendimento.

Può essere opportuno inoltre definire una fase iniziale di pura esplorazione che prescindia dalla conoscenza che si ha dello stato di mare incontrato. Altro aspetto rilevante in fase di progetto di questa strategia di apprendimento è la durata di un'azione di controllo caratterizzata dalla coppia c, k . Ipotizzato infatti che un singolo stato di mare possa essere considerato costante per un periodo pari a circa 60 minuti, a seconda della durata dell'applicazione di questa combinazione di parametri, si avrà un numero differente di esperienze che andranno a costituire il dataset su cui costruire il metamodello.

Il controllo effettuato in fase di esplorazione è dato dall'applicazione di coefficienti c e k presi in maniera casuale all'interno dello spazio delle azioni \mathcal{A} che ne definisce i loro vincoli. Sarà applicato pertanto un numero di azioni casuali che dipenderà dal numero di azioni applicabili data la durata del controllo definita in precedenza.

$$(C, K)_a = \text{rand}_{s.t. C, K \in \mathcal{A}}$$

In fase di ottimizzazione invece si decide di ottimizzare il controllo una volta sola.

$$(C, K)_a = \text{argmax}_{a' \in \mathcal{A}} \mathcal{M}(s_{sea}, a') = a$$

Le rimanenti azioni di controllo saranno calcolate secondo la seguente relazione.

$$(C, K)_\varepsilon = a + \text{rand}(-1,1) \cdot \varepsilon_{Te, Hs} \cdot \Delta a$$

Dove $\varepsilon_{Te, Hs}$ rappresenta il valore della greedy function nello stato di mare definito da Te ed Hs , a è l'azione ottimizzata nel primo controllo e Δa è un raggio di esplorazione iniziale. In questa maniera, nonostante si stia ottimizzando, in base alla quantità di esperienza che si hanno nello stato di mare s in cui si sta applicando il controllo, si svolgerà comunque un processo di esplorazione dell'intorno dell'ottimo. Questo intorno inoltre sarà tanto più vicino all'ottimo calcolato quanto sarà la conoscenza che si ha dello stato di mare. La greedy function in questa maniera viene utilizzata come una rappresentazione dell'inaffidabilità del metamodello in quella condizione di stato. Una rappresentazione schematica della strategia di apprendimento è presentata nella figura successiva.

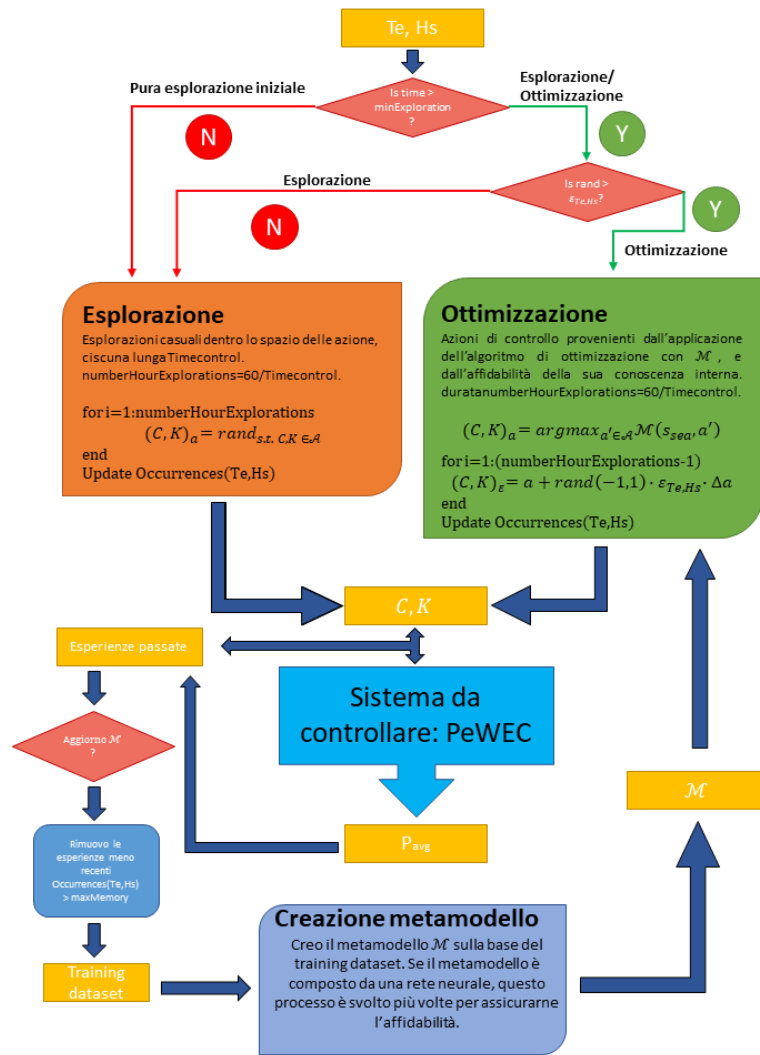


Figura 23 Strategia di apprendimento data-driven proposta per il dispositivo PeWEC.

5.2.5. Definizione della durata del controllo

Altro parametro fondamentale da definire nello sviluppo della strategia di controllo proposta è la durata dell'azione di controllo ΔT_{ctrl} . Questo parametro infatti influenza in maniera sostanziale la quantità di variabilità che, a parità di stato di mare e parametri di controllo C e K, si presenterà nella potenza assorbita dal dispositivo, come analizzato in [6]. Per definire in maniera più precisa questo parametro, si è deciso di effettuare una simulazione di apprendimento lunga 28 giorni, applicando un metamodello di tipo rete neurale senza alcun tipo di input aggiuntivo e la strategia presentata in precedenza. Tale simulazione, è stata svolta con un solo parametro controllato (il damping C) ed un set di stati di mare ridotto (14 stati di mare presentati nella tabella successiva), ipotizzando che ognuno di essi duri un'ora intera e che abbia nel corso delle 4 settimane un numero di ore di occorrenza come quello che è riportato in tabella.

5.3. Valutazione delle differenti configurazioni di metamodello: simulazione di apprendimento annuale

Dopo che la strategia di apprendimento, assieme alla lunghezza della valutazione dell'azione di controllo, sono state definite, la migliore configurazione in termini di metamodello capace di garantire la migliore convergenza e produttività deve essere individuata. Per fare ciò, 4 differenti configurazioni di metamodello sono state prese in considerazione:

1. Rete neurale, no additional features
2. Random forrest, no additional features

3. Rete neurale, con additional features
4. Random forrest, con additional features

La scelta di queste 4 configurazioni è motivata dalla necessità di comparare i differenti approcci (neural-network-based e tree-based) in termini di compatibilità con la funzione desiderata all'interno dell'algoritmo proposto, e dalla capacità che la foresta ha rispetto al singolo albero di generalizzare con una qualità migliore la relazione che intercorre tra i dati utilizzati.

La simulazione utilizzata per valutare le 4 configurazioni è così strutturata:

- La durata totale della simulazione è di 365 giorni.
- Ogni singolo stato di mare è stato considerato durare un'ora.
- Gli stati di mare sono stati inanellati in maniera casuale, fino a costituire la simulazione annuale, ma rispettando la probabilità di occorrenze che descrive il sito di installazione considerato, cioè Pantelleria.
- Per poter valutare lo stato di apprendimento aspettato, l'expected annual energy productivity è stata calcolata alla fine di ogni giornata di apprendimento. Questo parametro è costituito dalla potenza che si assorbirebbe se in quell'istante l'apprendimento terminasse e si utilizzassero soltanto le azioni ottenute dall'ottimizzazione del metamodella ottenuto in quel momento. Per tenere conto della variabilità che la produttività ha a causa del contributo stocastico inserito dall'onda nella simulazione, la produttività è stata simulata 10 volte, e il valore medio è stato considerato come valore di riferimento. I valori massimi e minimi sono stati anche riportati.

$$EAEP = \frac{3600 \cdot 24 \cdot 365}{100} \sum Occ_{\%,seastate} P_{avg,abs,seastate}(\mathcal{M}_n)$$

Dove $P_{avg,abs,seastate}(\mathcal{M}_n)$ è la potenza assorbita in un certo stato di mare quando è applicato il controllo ottimizzato sulla base del metamodella \mathcal{M}_n costruito all'esperienza n , e $Occ_{\%,seastate}$ è la percentuale di occorrenze che uno stato di mare ha in un certo sito di installazione.

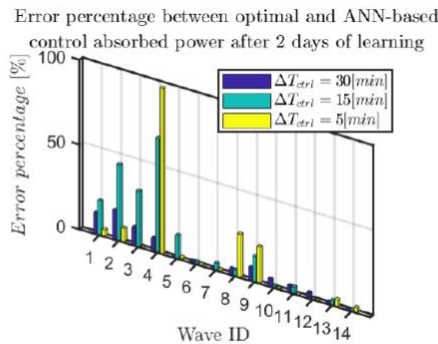
La struttura della rete neurale che è stata utilizzata è di tipo feedforward, con 7 hidden layers da 128 neuroni ciascuno. Le funzioni di attivazione utilizzate in questi layer sono del tipo ReLU (rectified linear unit), mentre quella del layer di output è di tipo logistico. L'algoritmo di training adottato è di tipo Adam (una versione del classico algoritmo stochastic gradient descent che adotta un approccio mini-batch nella fase di apprendimento) con una dimensione dei batch impiegati di 128. L'utilizzo di un approccio mini-batch con queste dimensioni permette di ottenere una risposta dotata di maggiore generalizzazione e di evitare fenomeni di overfitting tipici delle reti neurali applicate in problemi di regressione. I dati in input sono stati normalizzati precedenti attraverso il metodo zscore.

La random forest invece è stata sviluppata utilizzando 140 alberi, ciascuno con una dimensione minima delle foglie di 20 elementi. L'algoritmo di apprendimento ensemble utilizzato per la definizione dei rami e delle foglie interne ai singoli alberi che compongono la foresta è di tipo Least Square Boosting, in cui l'obiettivo ad ogni step è la minimizzazione dell'errore quadratico medio tra la risposta con l'albero allenato e i dati utilizzati nella fase di training.

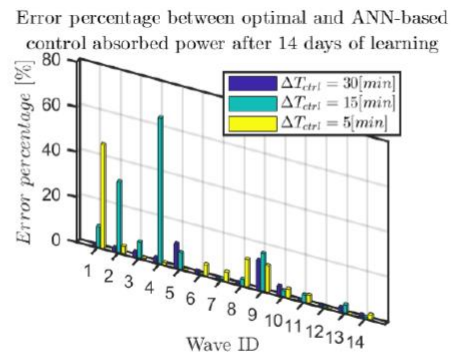
Wave ID	H_s [m]	T_e [s]	Occurrences [hrs]
1	0.5	3.5	33
2	0.5	5.0	158
3	0.5	6.5	10
4	0.5	8.0	7
5	1.4	3.5	50
6	1.4	5.0	197
7	1.4	6.5	40
8	1.4	8.0	6
9	2.3	3.5	1
10	2.3	5.0	80
11	2.3	6.5	31
12	3.2	5.0	9
13	3.2	6.5	48
14	4.1	6.5	2

Figura 24 Stati di mare simulati e relativa occorrenza annuale espressa in ore.

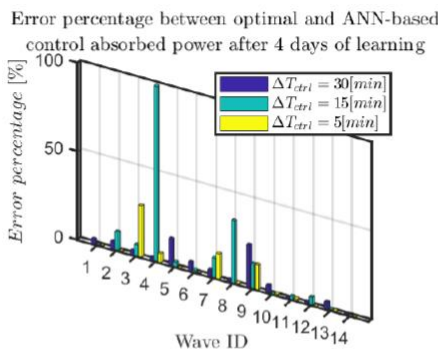
Le tre differenti durate di controllo che sono state considerate sono 5, 15 e 30 minuti. Per valutare la migliore di queste tre opzioni, l'output del metamodella (che descrive la potenza media assorbita in una certa configurazione di controllo e un dato stato di mare) è stato comparato con la potenza che il dispositivo assorbe in simulazione quando la variabilità della potenza è ridotta o nulla (quest'ultimo risultato è ottenuto simulando la potenza assorbita dal dispositivo in un orizzonte di un'ora). L'errore tra queste due grandezze è stato valutato in differenti momenti del processo di apprendimento, evidenziando quanto il bilancio tra misura di potenza più precisa (dovuta a un periodo di valutazione della misura più elevato) e maggior numero di esperienze (ottenuto quando il tempo di valutazione è ridotto) influenzi la qualità del metamodella prodotto, e di conseguenza la capacità di convergenza all'azione di controllo ottima. I risultati di tale comparazione sono presentati nella figura successiva.



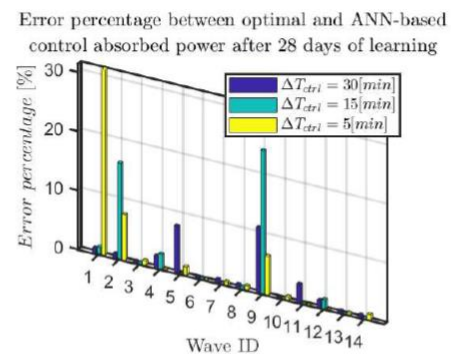
Error percentage with different ΔT_{ctrl} after 2 days.



Error percentage with different ΔT_{ctrl} after 14 days.



Error percentage with different ΔT_{ctrl} after 4 days.



Error percentage with different ΔT_{ctrl} after 28 days.

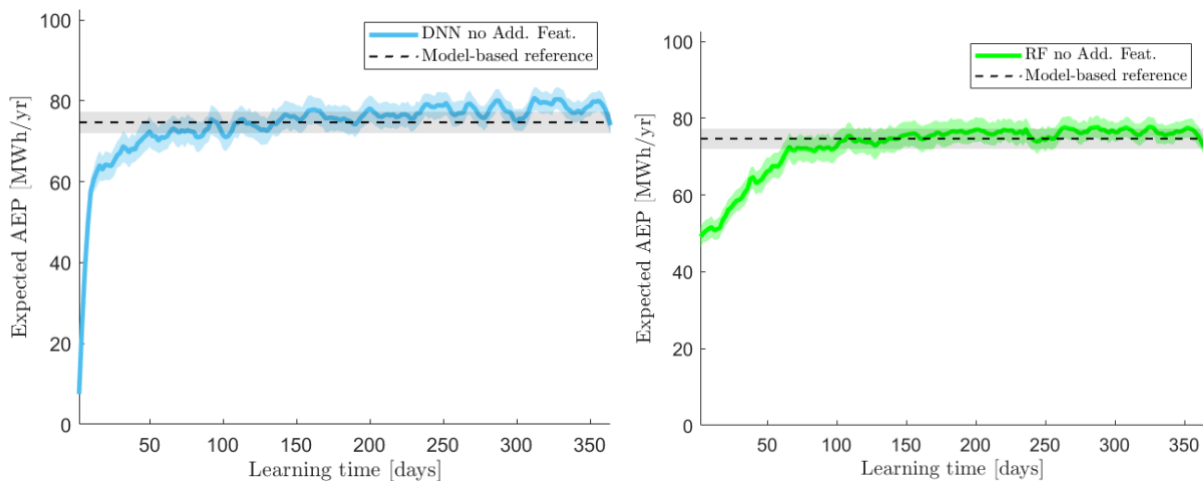
Come è possibile osservare, un periodo di valutazione dell'azione di controllo lungo 30 minuti è in grado, nonostante abbia un numero di esperienze totali ridotto, di ottenere un errore rispetto alla misura di potenza corretta che è minore rispetto alle altre due soluzioni. Conseguenza di ciò è la maggiore capacità del metamodella di generalizzare la relazione che intercorre tra controllo, stato di mare e potenza assorbita. È interessante inoltre sottolineare che, con questa

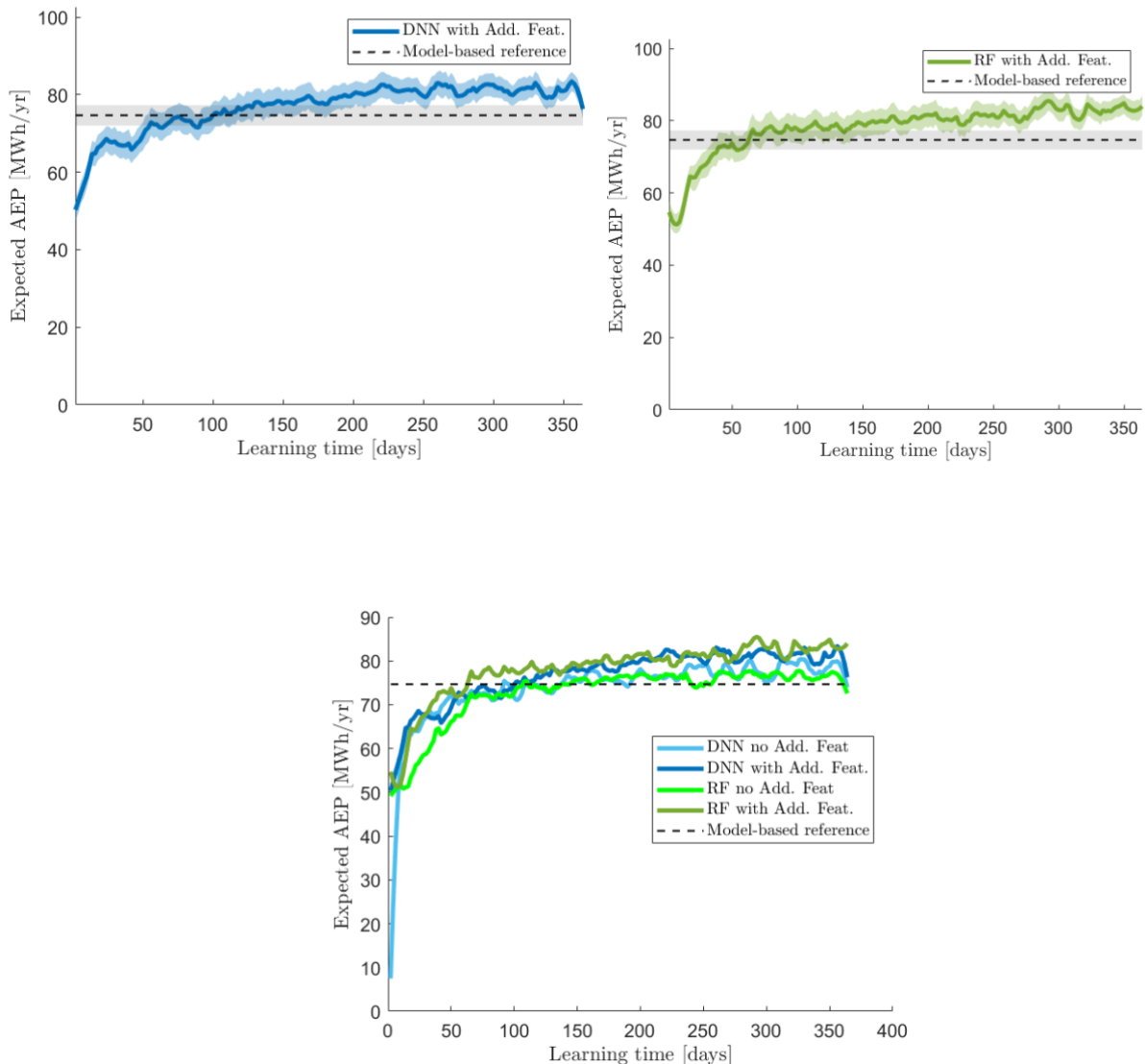
configurazione, l'errore maggiore che è osservato è presente nello stato di mare 9. In questo stato di mare, infatti, l'errore è nell'intorno del 10%. Tuttavia, questa condizione di mare all'interno delle 4 settimane di simulazione è osservata solamente un'ora in totale. Questo risultato evidenzia le capacità che un metamodellato di questo tipo ha nel condividere l'esperienza tra stati di mare contigui. Da segnalare inoltre la capacità che un orizzonte di 15 minuti ha nell'ottenere performance di qualità inferiore ma comunque accettabili. Questo motiverebbe una scelta di orizzonte compresa tra 15 e 30 minuti (nel momento in cui l'azione di controllo è descritta anche dal parametro di stiffness lo spazio di esplorazione aumenta e un maggior numero di esperienze a parità di tempo disponibile migliora la capacità di convergenza dell'algoritmo).

5.3.1. Risultati della simulazione di apprendimento

Per dimostrare la capacità del controllore proposto nell'adattarsi a un sistema differente da quello modellato in precedenza e per questo motivo superare le performance del controllo reattivo classico basato su una conoscenza pregressa del sistema, la simulazione di apprendimento di un anno è stata svolta con un modello del sistema a cui sono state modificati i parametri di lunghezza e profondità dello scafo, aggiungendo una incertezza normale con deviazione standard di 1m per entrambi i parametri del dispositivo (rispetto al modello nominale ottimizzato per Pantelleria). In questo modo, la valutazione delle 4 differenti configurazioni verrà effettuata andando ad osservare la capacità dell'algoritmo di convergere rapidamente all'assorbimento ottimo e di superare il controllo reattivo calcolato sulla base della conoscenza del modello nominale (quello non perturbato).

Come anticipato, sia il controllo fisso model-based che il controllo ottimizzato attraverso l'uso del metamodellato per l'apprendimento, sono stati valutati 10 volte (ciascuna con seed randomico differente) per ciascun stato di mare della scatter per tenere conto della variabilità nella produttività dovuta al fenomeno stocastico inserito dall'onda (la versione con apprendimento è stata valutata 10 volte al termine di ogni giorno della simulazione di apprendimento, per comprendere il livello di produttività che il sistema avrebbe se l'apprendimento terminasse in quelle condizioni).



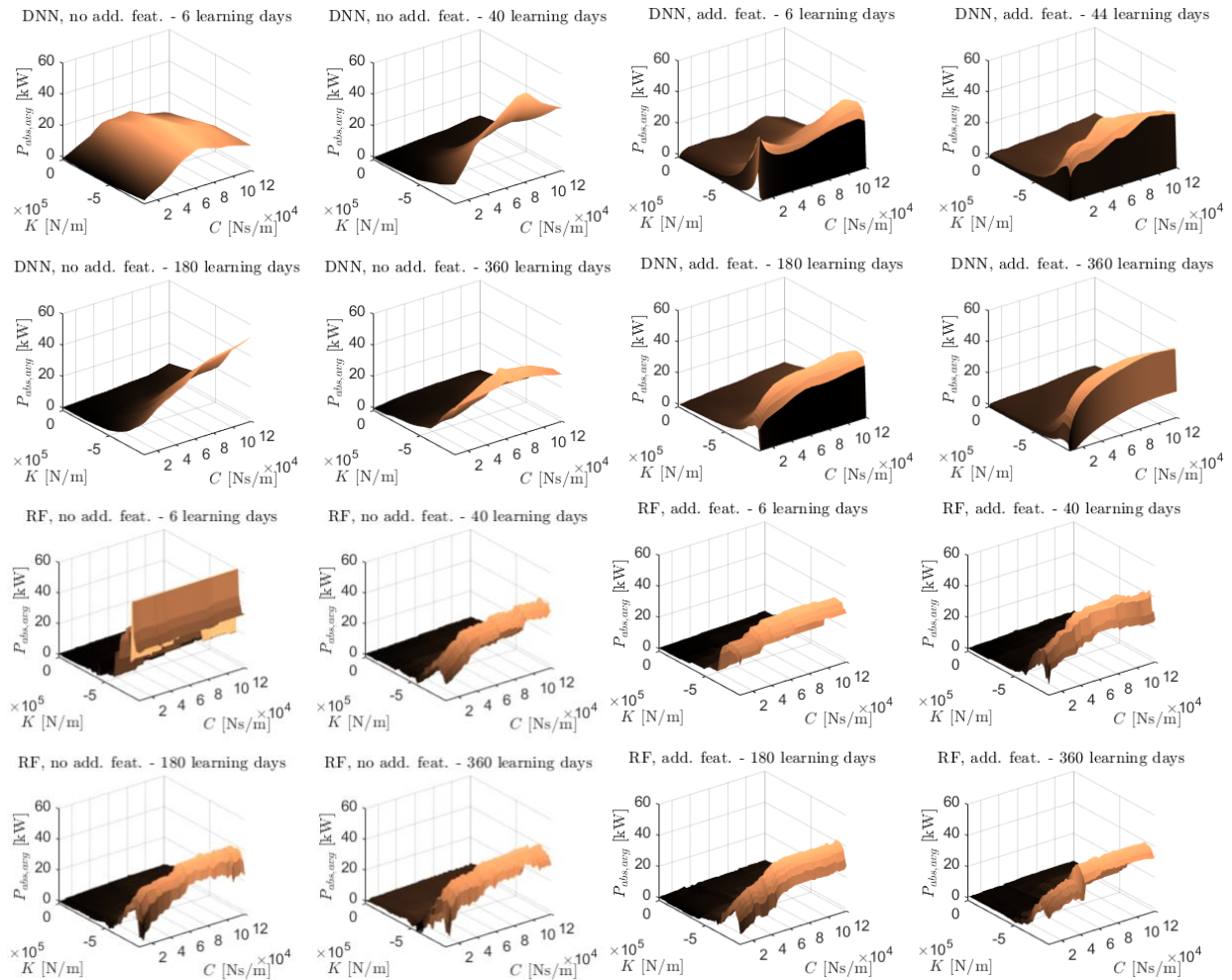


Osservando le figure precedenti, alcune considerazioni possono essere formulate:

- Tutti le configurazioni, dopo una fase iniziale, sono capaci di convergere a uno stato di apprendimento tale da riuscire a superare in media la strategia model-based.
- Le random forest senza additional features si assestano a performance simile a quelle della strategia model-based calcolata con il modello nominale non perturbato.
- Le reti neurali tendono ad avere una convergenza più rapida, anche se, come nel caso della random forest, la presenza di additional features migliora notevolmente le performance, in termini di produttività e sfruttamento delle esperienze soprattutto in fase iniziale (si noti la produttività con la configurazione con la rete neurale senza additional features nei primi giorni di apprendimento: non avendo a disposizione una quantità sufficiente di informazioni, la rete neurale nella fase iniziale non è in grado di descrivere al meglio la relazione che intercorre tra gli input di controllo, lo stato di mare e la potenza attesa).
- La strategia basata sulle additional features permette di superare in maniera consistente il controllo reattivo model-based, anche tenendo conto della variabilità delle onde.
- Tra reti neurali e random forest, nel caso con le additional features, non c'è una differenza sostanziale, anche se la seconda sembra essere più stabile nella convergenza e meno soggetta a variabilità.

Queste osservazioni sono motivabili dalle differenti capacità che hanno i vari metamodelli nelle quattro configurazioni di descrivere al meglio la funzione che mette in relazione gli input e gli output e di farlo in una maniera che sia

facilmente utilizzabile dall’algoritmo di ottimizzazione che calcola stiffness e damping ottimi fissato lo stato di mare. Nelle seguenti figure, è possibile osservare in diversi momenti dell’apprendimento come i metamodelli descrivano questa relazione in uno stato di mare fissato ($T_e = 6s$, $H_s = 2m$).



Come è possibile osservare, la rete neurale dopo 6 giorni, sia nel caso senza le additional features - che con le additional features non riesce ad ottenere una funzione con forma simile a cui convergono tutte le altre alla fine dell’anno. Inoltre, è possibile osservare come la presenza di features aggiuntive abbia un effetto benefico più accentuato nel caso delle random forest. Infatti queste non soltanto migliorando la qualità della funzione dopo un numero di esperienze limitato, ma esse riducono la presenza di minimi locali dovuti alla definizione di funzione definita a tratti intrinseca degli alberi che costituiscono la foresta.

5.3.2. Conclusioni su controllo data-driven

Una strategia data-driven capace di controllare il sistema PeWEC ottimizzato per il sito di Pantelleria è stata sviluppata. Questa, basata sull’utilizzo di reti neurali e random forest è in grado di apprendere il controllo reattivo ottimo sulla base soltanto della conoscenza dello stato di mare in cui è posto il sistema e sui dati misurati durante l’utilizzo del dispositivo stesso. Questa sua caratteristica permette al controllo di adattarsi al cambiamento che il sistema può subire durante il periodo in cui esso è installato. Inoltre, essendo totalmente model-free, il controllo non è affetto dalle incertezze di modello che si possono presentare, specialmente nella parte idrodinamica. I diversi parametri critici per il design (in particolare la scelta del periodo di valutazione della potenza) sono stati analizzati e presentati. Una simulazione di apprendimento della durata annuale è stata effettuata per comparare le differenti configurazioni dei metamodelli, evidenziando l’importanza anche della definizione degli input del metamodello.

6. Analisi Meteocean del sito di installazione

Si considera come caso studio per PeWEC un sito nei pressi dell'isola di Pantelleria. Questo sito è stato considerato sia per le caratteristiche energetiche del sito sia per la favorevole batimetria. Infatti, nella zona di analisi il fondale marino è poco profondo e con bassa variazione di livello e questo comporta una un costo legato al sistema di ormeggio contenuta. Di seguito è riportata una figura raffigurante la batimetria del sito considerato. È stato considerato un tratto di 1km a largo dell'isola a Nord-Ovest. Per l'installazione dell'ormeggio è stata quindi considerata una profondità media di 32 m per il caso studio in analisi.

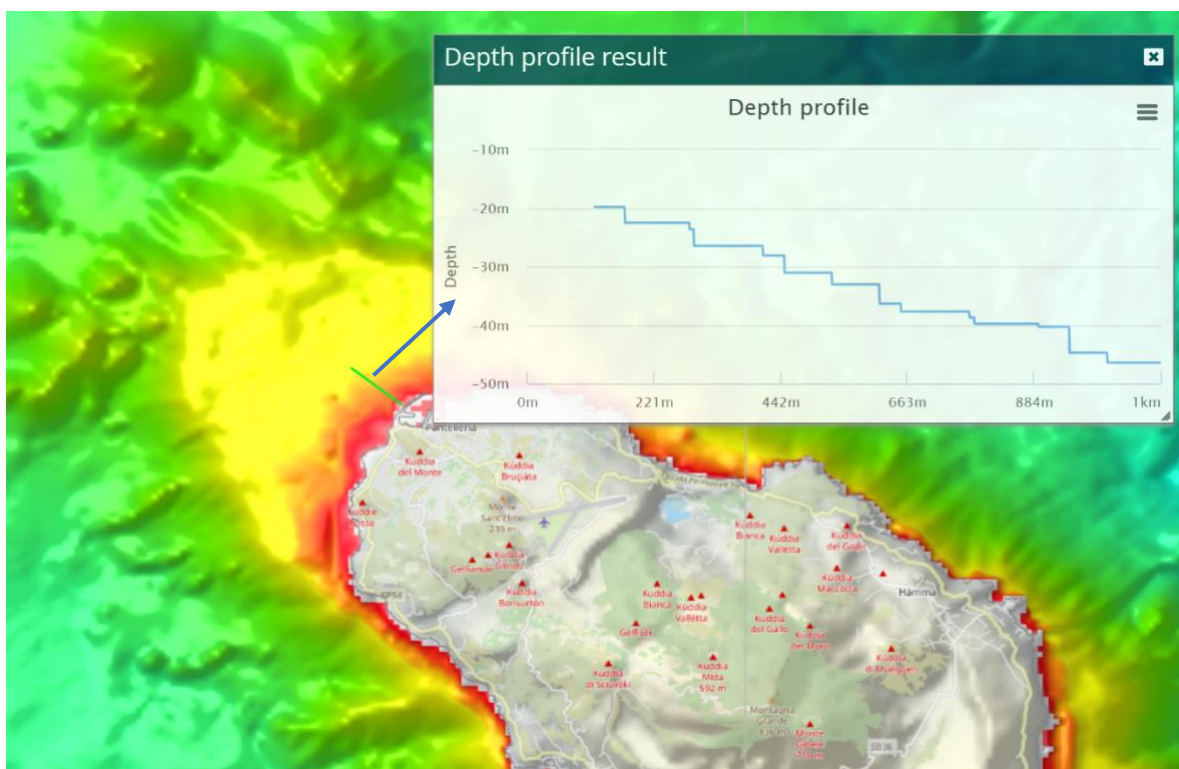


Figura 25 In blu il tratto di mare considerato per la batimetria e riportato nel grafico, fonte <https://portal.emodnet-bathymetry.eu/>.

Per determinare gli stati di mare estremi sono necessari una quantità rilevante di dati storici del profilo ondoso per poter estrapolare in maniera efficace e attendibile le statistiche dei casi estremi. La normativa DNV RPs-205 prevede una storia temporale di almeno 20 anni. In mancanza di questa mole di dati per il sito specifico in analisi sono stati elaborati i dati della boa ondometrica del RON (Rete Ondometrica Nazionale) disposta al largo di Mazara del Vallo; questi dati presentano una discretizzazione temporale ad intervalli tri orari. L'analisi può essere condotta con due diversi metodi, come suggerito dagli standard normativi [8]. Il processo dopo la selezione dei dati considerati è lo stesso per entrambe le metodologie, ma la scelta della distribuzione statistica è influenzata.

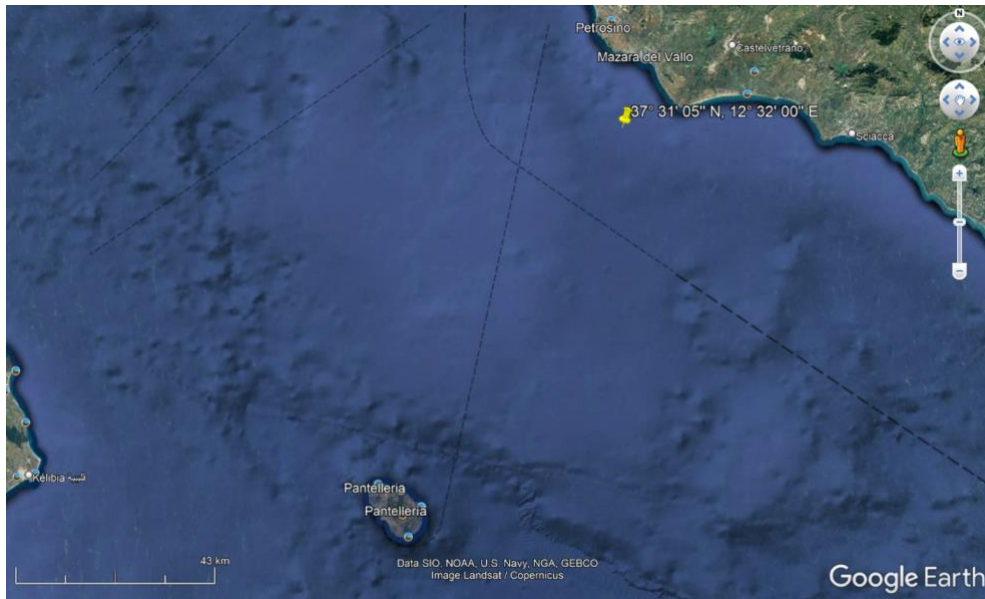


Figura 26 Coordinate della boa ondometrica RON nei pressi di Mazara del Vallo.

6.1. Environmental Contour

L'Environmental Contour rappresenta una linea iso-probabilità che correla due grandezze specifiche, H_s (altezza d'onda significativa) e T_e (periodo energetico) nel caso in esame, e dunque utile per una valutazione statistica di quelli che sono gli eventi estremi di un particolare sito. Dato una percentuale di superamento del contorno si definisce il periodo di ritorno che caratterizza la conformazione di quel particolare EC (Environmental Contour). Nell'analisi seguente si considera un periodo di ritorno di 100 anni, che corrisponde a una probabilità di superamento annua pari a $1e-2$. I vari stati di mare individuati sul contorno sono poi valutati e caratterizzano le condizioni estreme per cui un dispositivo deve poter sopravvivere senza comportare un danno catastrofico del sistema.

Per la valutazione dell'EC si può procedere con due approcci differenti:

- Metodo globale
- Metodo degli eventi estremi

6.1.1. Metodo Globale

Nel metodo globale viene considerato tutto il set di dati a disposizione. La problematica di questa metodologia è la correlazione temporale nella valutazione dello stato del mare. Le caratteristiche del mare cambiano lentamente, quindi due valutazioni ravvicinate sono simili tra loro. Questo può influenzare la descrizione dei fenomeni in quanto la distribuzione scelta per definire i dati cattura meglio il nucleo, ma la coda può essere mal descritta in quanto l'EC è fortemente dipendente dall'andamento della coda. Questo può essere risolto scegliendo una distribuzione che si adatti meglio al campione in esame.

6.1.2. Metodo degli eventi estremi

Nel metodo degli eventi estremi il set di dati viene manipolato in modo da considerare solo gli eventi estremi (ad esempio si può eseguire un'analisi della soglia di picco). La definizione di evento estremo è problematica, in quanto la scelta di una soglia può incidere drasticamente sui risultati. Il modo di procedere è minimizzare alcune funzioni di valutazione della distribuzione [7][8]. Ma se la soglia è posta troppo alta, i dati nell'analisi possono essere davvero pochi, quindi il problema può essere mal condizionato poiché l'incertezza statistica aumenta. In questo capitolo verrà spiegata l'analisi con il metodo globale, in quanto i risultati ottenuti con il metodo degli eventi estremi non sono soddisfacenti data la grandezza limitata del campione.

6.2. Scelta della distribuzione per il modello di NATAF

La distribuzione statistica scelta per modellare i dati è cruciale per ottenere un corretto EC. La distribuzione dovrebbe adattarsi bene alla coda dei dati poiché l'obiettivo di questa analisi è valutare gli stati del mare estremi. Gli standard suggeriscono di utilizzare una distribuzione Weibull a tre parametri per H_s e una distribuzione lognormale per T_e condizionata a H_s o se in possesso delle sole distribuzioni di probabilità procedere con un'analisi di NATAF. Entrambe le analisi sono state portate a termine e confrontate. Di seguito è riportato il processo per l'analisi con il modello di NATAF.

Alcuni parametri dovrebbero essere valutati per valutare la qualità della distribuzione scelta, come la bontà di adattamento della distribuzione GoF (Goodness of fitness). Per entrambi i set di dati è stata scelta una distribuzione Gamma poiché l'andamento è migliore sulla coda con questa distribuzione di probabilità.

$$F(H_s, a, b) = 1 - \frac{1}{b^a \Gamma(a)} \int_0^{H_s} t^{a-1} e^{-\frac{t}{b}} dt$$

Gamma CDF (Cumulative Distribution Function), a e b sono valutati considerando il campione in esame.

6.3. Environmental Contour: metodo di NATAF

Note le CDF dei due parametri, viene eseguita una trasformazione di Nataf per valutare il fattore di correlazione nello spazio gaussiano. L'inverso del CDF standard Φ^{-1} viene eseguito per considerare la correlazione tra H_s e T_e , in quanto i valori associati alla probabilità cumulativa sono ora confrontabili. Il fattore di correlazione viene quindi utilizzato per valutare il Periodo Energetico associato ad una specifica altezza d'onda significativa.

$$Y_1 = \Phi^{-1}(h_s)$$

$$Y_2 = \Phi^{-1}(t_e)$$

Il fattore di correlazione viene valutato con la funzione *corrceff* implementata in Matlab, che valuta la matrice di correlazione di Pearson.

$$R = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} \\ \rho_{12} & 1 \end{bmatrix}$$

Il passo successivo consiste nella valutazione di β , il raggio della sfera nello spazio gaussiano. β dipende dal numero dell'evento N_e e dal periodo di ritorno T_r scelto.

$$\beta = -\Phi^{-1}\left(\frac{1}{T_r * N_e}\right)$$

N_e dipende dalla tipologia del campione. Per un campione tri orario $N_e = 365 * 8 = 2920$.

$$u_1 = \beta \cos \theta$$

$$u_2 = \beta \sin \theta$$

$$0 < \theta < 2\pi$$

I contorni vengono ora valutati eseguendo l'ICDF (Inverse Cumulative Distribution Function) della relativa funzione di distribuzione utilizzata per modellare il set di dati.

$$H_s = F_{hs}^{-1}(\Phi(u_1))$$

$$T_e = F_{te}^{-1}\left(\Phi\left(u_2\sqrt{1-\rho_{12}^2} + \rho_{12}u_1\right)\right)$$

Di seguito è riportata l'immagine dell'EC prodotto dall'analisi.

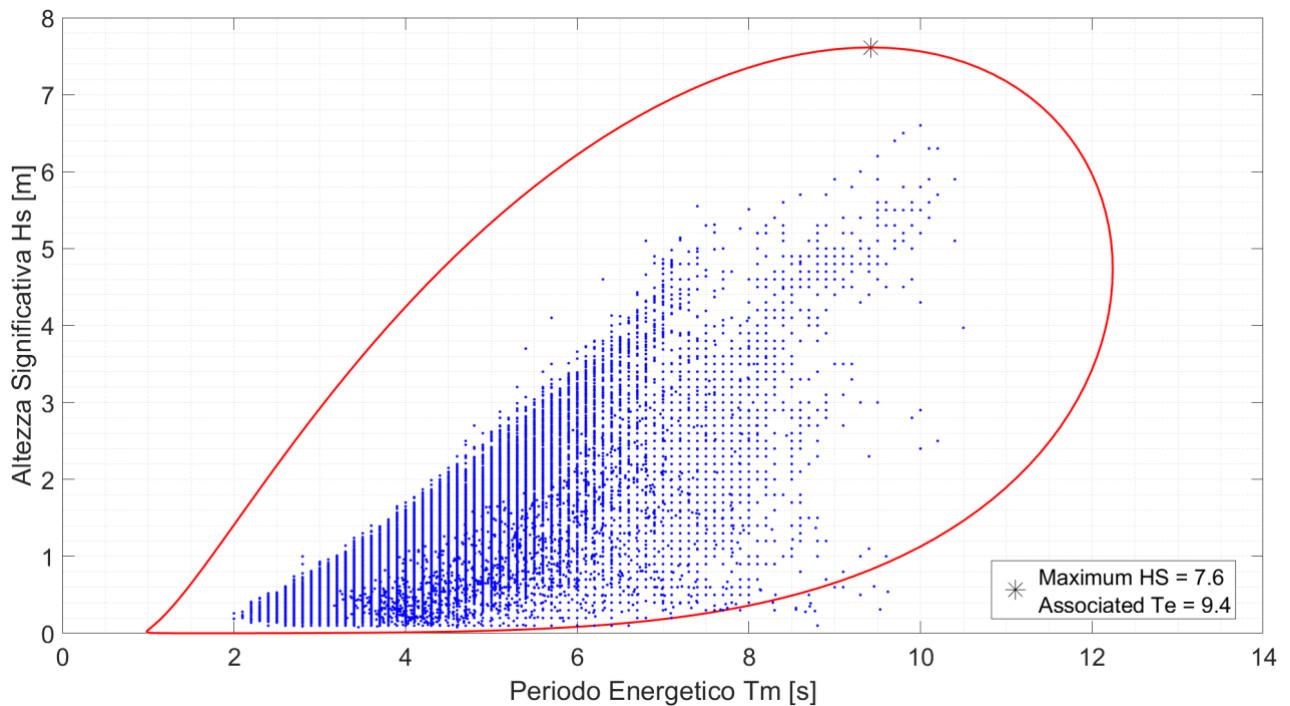


Figura 27 EC ottenuti con il modello di NATAF di Mazara del Vallo con un periodo di ritorno di 100 anni.

6.4. EC: metodo CMA

Per eseguire un'analisi CMA (Conditional Modelling Approach) il primo passo è quello di adattare una distribuzione Weibull a tre parametri per H_s , poiché i parametri di posizione saranno cruciali per continuare l'analisi.

$$F_{h_s} = 1 - e^{-\left(\frac{h_s - \gamma_{h_s}}{\eta}\right)^\beta}$$

Il parametro di posizione γ_{h_s} viene scelto considerando il GoF della diversa distribuzione adattata ai dati. Nel caso selezionato la posizione è 0.1. Viene effettuato un cambio di variabile per sfruttare la distribuzione Weibull a due parametri già implementata in Matlab.

$$h'_s = h_s - \gamma_{h_s}$$

$$F_{h'_s} = 1 - e^{-\left(\frac{h'_s}{\eta}\right)^\beta}$$

Il set di dati è suddiviso in diverse bande e sui dati contenuti in tali bande viene adattata una distribuzione lognormale. Le bande sono in ampiezza crescente dato che il numero di punti contenuti nelle bande stesse diminuisce drasticamente all'aumentare di h'_s , in quanto gli eventi più frequenti sono a h'_s basso. Le bande sono definite come:

$$h'_{s\text{ Bounds}} = 6.5(1 - \cos \varphi)$$

$$0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$$

È importante ricordare che H_s è il vero valore dei dati. Quindi l'adattamento di queste equazioni viene eseguito con il valore medio delle bande aumentato della posizione γ_{h_s}

$$h_{s\mu} = \text{mean}(h'_s) + \gamma_{h_s}$$

T_e è inserito in diverse distribuzioni lognormali, una per ogni banda. Dopo questa procedura è possibile valutare una funzione analitica che definisca gli andamenti dei parametri per la distribuzione lognormale condizionata ad H_s . L'equazione per la media e la deviazione standard sono, come suggerito dagli Standard [9]:

$$\mu(H_S) = a_0 + a_1 H_S^{a_2}$$

$$\sigma(H_S) = b_0 + b_1 e^{(b_2 H_S)}$$

La procedura per valutare il contorno è simile alla trasformazione di Nataf, con la differenza che il fattore di correlazione di Pearson non è necessario in quanto la distribuzione di T_e tiene già conto della dipendenza da H_s . Quindi, la trasformazione dallo spazio normalizzato standard allo spazio fisico viene eseguita, utilizzando i vettori u_1 e u_2 .

$$H_s = F_{H_s}^{-1}(\phi(u_1))$$

$$T_e = F_{T_e|H_s}^{-1}(\phi(u_2))$$

La distribuzione utilizzata per la valutazione di T_e cambia parametri secondo le precedenti equazioni, in relazione a H_s . Nella figura sottostante è riportato l'EC utilizzando un periodo di ritorno di 100 anni e un set di dati di 3 ore.

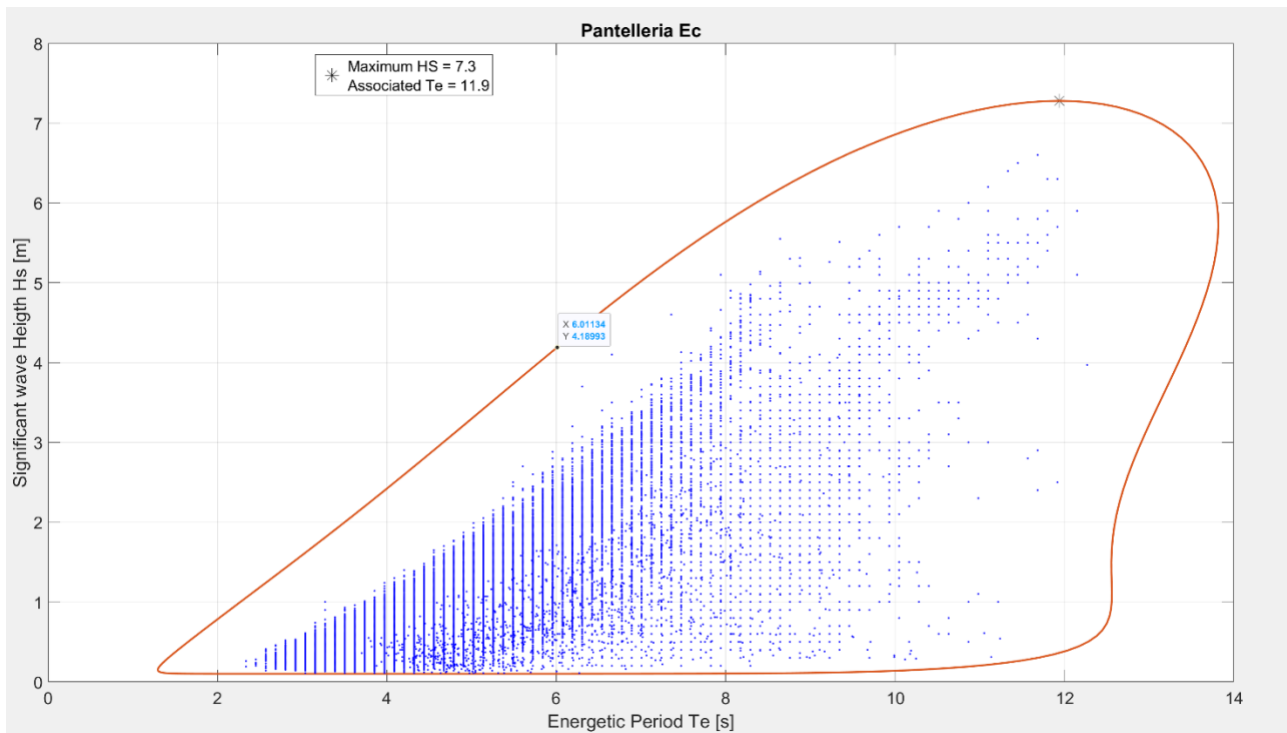


Figura 28 EC ottenuti con il modello CMA di Mazara del Vallo con un periodo di ritorno di 100 anni.

6.5. Confronto tra i modelli

La differenza tra i due metodi è evidente. L'approccio NATAF è un approccio più debole in quanto la correlazione è considerata solo con un singolo parametro, che è il parametro di correlazione di Pearson. Nell'approccio CMA il risultato del contorno è più accurato. Il lato inferiore destro del contorno è meno importante, poiché per la definizione dell'onda di periodo alto di risposta estrema associata ad altezza d'onda significativa bassa non sono rilevanti. Nonostante ciò, il modello CMA offre una migliore descrizione di tali stati di mare. Anche l'andamento del punto più alto è meglio descritto dall'approccio CMA. La differenza più evidente si vede proprio nei periodi intermedi, dove il modello CMA si distingue notevolmente dal modello di NATAF offrendo una descrizione più veritiera degli stati di mare. Per questo motivo è stato considerato per le analisi future l'EC ottenuto con il modello CMA.

6.6. Analisi degli eventi di breve durata

Lo stato di progettazione per un WEC non è facile da definire. I Wave Energy Converters (WECs), e in particolare PEWEC, sono dispositivi che lavorano a risonanza e per questo motivo non deve essere considerata solo l'onda più alta sull'EC

nell'analisi degli stati di mare estremi. Per questo motivo il periodo considerato per la generazione degli spettri è il periodo energetico [10], in quanto in grado di eccitare maggiormente un particolare grado di libertà, come il beccheggio:

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

Dove m_n è il momento dello spettro di ordine n . Tali informazioni sono necessarie per il passaggio

Il sistema PeWEC, presentando un periodo di risonanza che è compreso nell'intervallo di periodi con elevata occorrenza per il sito analizzato, deve essere testato anche nelle condizioni estreme che massimizzano la risposta del sistema a quelle frequenze. Come evidenziato in Figura 10 il periodo di massima risposta del sistema (condizione di risonanza) si trova nell'intorno dei 6 s. Le onde scelte dal contorno ambientale hanno quindi periodi che vanno da un periodo più basso di quello di risonanza fino al periodo corrispondente all'onda più alta sul contorno, passando per il periodo di risonanza, con un ΔT inferiore a 1 secondo.

7. Confronto risultati dati ondametrici sperimentali con dati simulati

Al fine di valutare con più precisione i dati della risorsa ondosa per il sito di installazione di interesse è stata installata nel 2021 una boa ondametrica al largo della costa nord-ovest di Pantelleria. Ulteriore obiettivo di questa installazione è la validazione futura dei dati ondametrici ottenuti tramite modelli numerici sviluppati da ENEA per la suddetta zona di interesse. In particolare, l'utilizzo di strumentazione in-situ ha, tra i principali vantaggi, quello di fornire una serie storica altamente dettagliata ed affidabile. Contemporaneamente, l'installazione prevede costi elevati dovuti, sia alla strumentazione stessa, che all'installazione e mantenimento. Inoltre, fornendo informazioni di un dato sito, non consentono di conoscere le caratteristiche degli stati di mare in siti adiacenti. Questa limitazione è particolarmente accentuata nelle località con batimetrie irregolari e linee di costa impervie: nelle zone di acque basse, dove solitamente sono installabili le strumentazioni, la variabilità delle caratteristiche delle onde è molto accentuata a causa dell'interazione con il fondale. Per rispondere alla necessità di avere informazioni sulla propagazione delle onde o per conoscere le caratteristiche degli stati di mare in una certa zona, è necessario ricorrere alla modellazione numerica; essi consentono di simulare l'idrodinamica costiera e sono riproducono la fisica del sistema di studio.

Il sito di analisi si trova vicino alla costa nord-occidentale dell'isola di Pantelleria. L'isola si trova quasi al centro del Canale di Sicilia, in un'area è caratterizzata da un andamento irregolare delle linee batimetriche e da profondità variabili. La boa installata è una Datawell Waverider DWR-G: questo strumento è dotato di un modulo Global Positioning System (GPS) che consente la misurazione direzionale delle onde. Lo scafo è caratterizzato da una forma sferica ed è in grado di misurare frequenze fino a 0,01 Hz (corrispondenti a un periodo d'onda di 100 s), mentre le dimensioni della boa stessa limitano la sua risposta alle alte frequenze.

Il modello numerico utilizzato per ottenere i dati ondametrici ad alta risoluzione spaziale e temporale è WAVES, sviluppato da ENEA. Esso ha fornito la serie storica dei principali parametri di interesse per il periodo che va da inizio 2014 a fine 2019 e risoluzione spaziale pari a $1/128^\circ$ (36.81719°N , 11.91406°E). Per effettuare un confronto omogeneo, tra i dati strumentali e quelli modellati, sono stati estratti i parametri di interesse riferiti ai mesi compresi tra settembre e febbraio 2021. La Figura 9 mette in evidenza la posizione della boa (36.82°N 11.92°E) con l'area di mare riferita ai parametri ottenuti dalla modellazione matematica. Data lo spostamento, anche se moderato, della boa rispetto all'area oggetto di modellazione, alcune differenze, specialmente in termini di direzionalità, sono previste. Inoltre, gli anni a cui fanno riferimento i due set di dati non coincidono e questa differenza comporta una possibile variabilità nei confronti. Anche le batimetrie di riferimento differiscono in maniera modesta: la batimetria riferita alla boa è pari a 33 m e quella riferita al modello numerico è pari a 62 m.

In questo paragrafo vengono riportati due esempi di attori industriali presenti e operanti sul territorio italiano per la costruzione del prototipo in scala al vero di PeWEC. La prima società è la Rosetti Marino SPA esperta nel settore della progettazione e costruzione di strutture offshore con applicazioni principalmente nel campo dell'oil&gas ed esperti nella cantieristica navale. La loro sede operativa e cantieristica si trova presso il porto industriale di Ravenna. Altra società di interesse per la realizzazione e assemblaggio dell'unità pendolare, configurazione quadri elettrici e testing in officina è la ARIS SPA presente in territorio piemontese nei pressi di Torino. Punto di forza della società è l'aver già lavorato in

ambito wave energy collaborando al progetto ISWEC in collaborazione con il Politecnico di Torino possedendo quindi il dovuto know how per lo sviluppo di questa tecnologia innovativa.

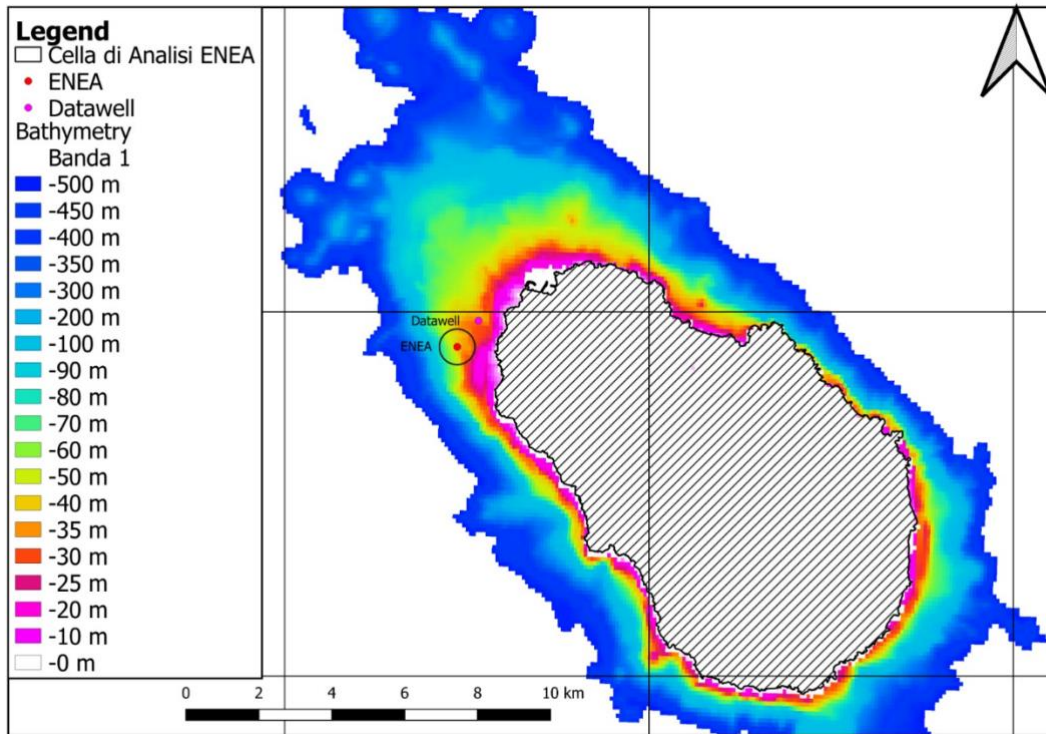


Figura 29 Geolocalizzazione del punto di analisi del modello numerico di propagazione delle onde di ENEA e della boa ondometrica installata a Pantelleria con batimetria del fondale.

7.1. Rosa delle onde

Il confronto riguardante la direzionalità fornita dai due set di dati è stata effettuata confrontando la rosa delle onde. Tali grafici consentono di identificare i settori di provenienza delle onde più frequenti, oltre a mostrare i range di altezza significativa delle onde principali.

La Figura 30 rappresenta la rosa delle onde ottenuta con i dati forniti da ENEA, mentre la Figura 31 indica la rosa delle onde riferita ai dati strumentali. Come è possibile notare, i dati modellati riescono a cogliere con buona accuratezza le direzioni principali del fronte d'onda. La principale differenza, tuttavia, riguarda la scarsa variabilità che si registra nel settore Nord-Ovest.

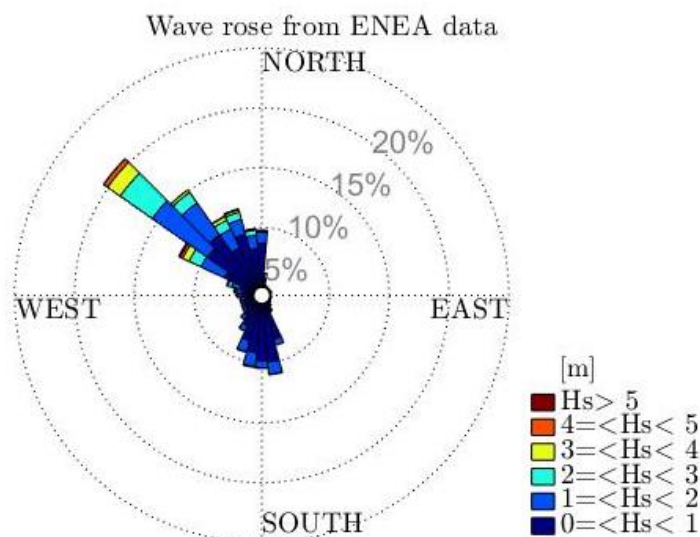


Figura 30 Rosa delle onde ricavato dai dati numerici del modello ENEA riferito agli anni 2014-2019 e per i mesi febbraio-settembre.

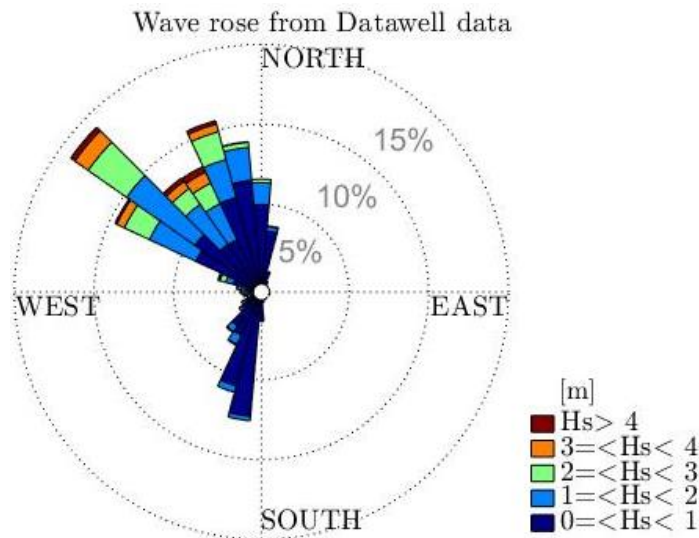


Figura 31 Rosa delle onde ricavato dai dati sperimentali riferito all'anno 2021 e per i mesi febbraio-settembre.

7.2. Diagramma delle occorrenze

Per comprendere quali stati di mare risultano essere i più occorrenti, e quindi i più frequenti, le scatter delle onde sono state prodotte. Il confronto tra la scatter ottenuta dai dati forniti da ENEA (Figura 32) e la scatter ottenuta dai dati misurati (Figura 33) consente di confermare la buona conformità dei due set di dati. Entrambe le scatter, infatti, mostrano che le onde maggiormente frequenti hanno un'altezza d'onda significativa compresa nel range 0.25 m e 1 m, mentre i periodi energetici sono principalmente compresi tra i 2 s e i 4 s.

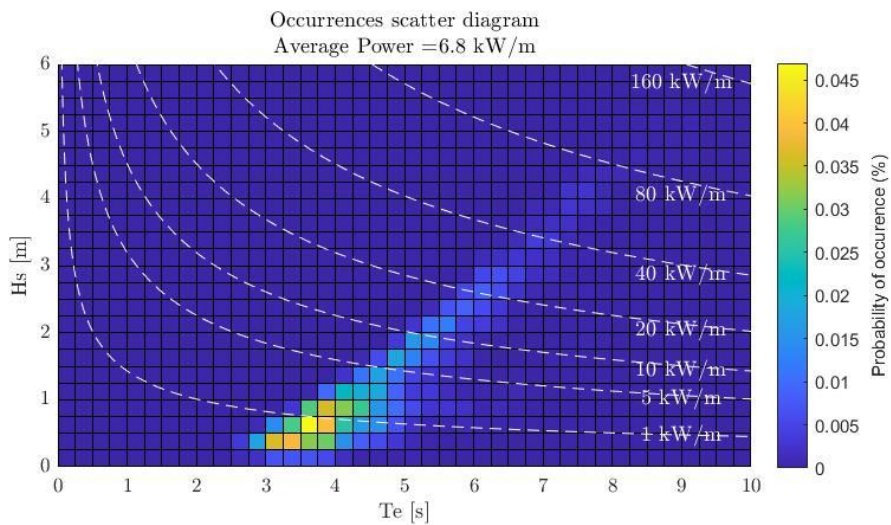


Figura 32 Diagramma delle occorrenze ricavato dai dati numerici del modello ENEA riferito agli anni 2014-2019 e per i mesi febbraio-settembre.

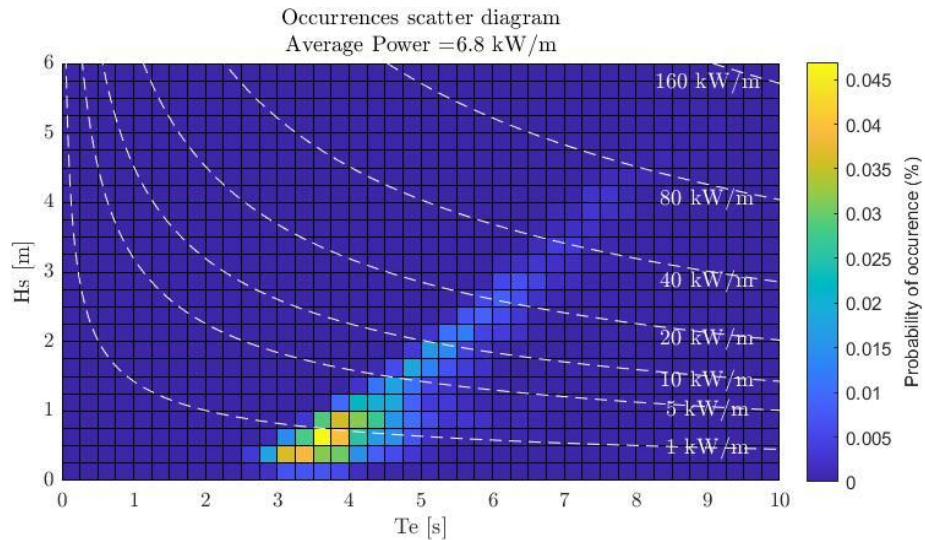


Figura 33 Diagramma delle occorrenze ricavato dai dati sperimentali riferito all'anno 2021 e per i mesi febbraio-settembre.

7.3. Variabilità mensile

Per comprendere la variabilità mensile dei parametri di interesse, e valutare l'affidabilità dei dati ottenuti da modellazione numerica, sono stati prodotti i grafici rappresentanti i valori medi dei parametri sintetici rispetto ai diversi anni di informazioni. In particolare, i dati riferiti agli anni compresi tra il 2014 ed il 2019 corrispondono ai dati ottenuti dal modello WAVES, mentre i dati del 2021 corrispondono a quelli registrati dalla boa.

I confronti rispetto alla variabilità mensile sono riferiti all'altezza significativa delle onde (Figura 34), al periodo energetico (Figura 35) e alla potenza delle onde (Figura 36) e confermano la conformità dei dati.

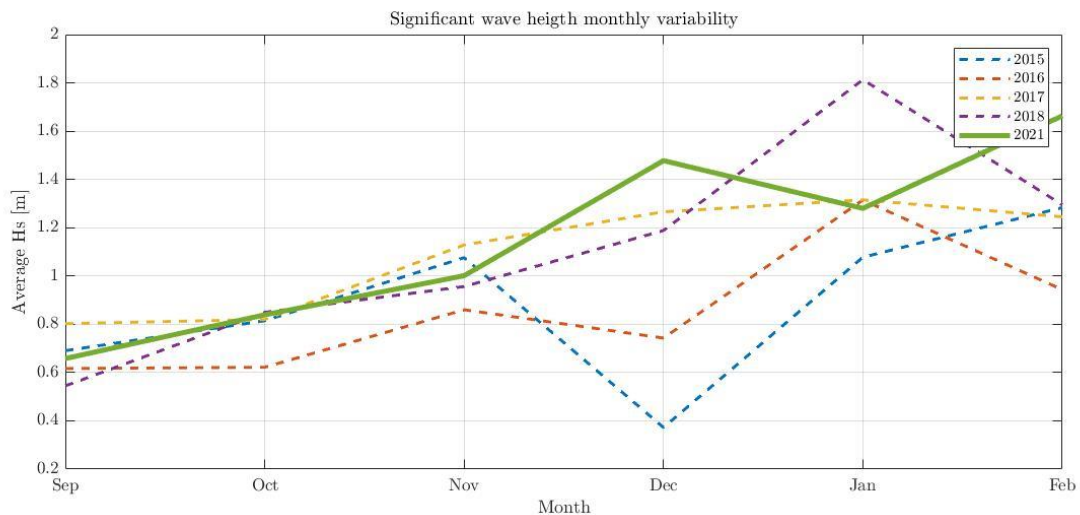


Figura 34 Variabilità mensile dell'altezza d'onda significativa, considerando sia i dati modellati che strumentali.

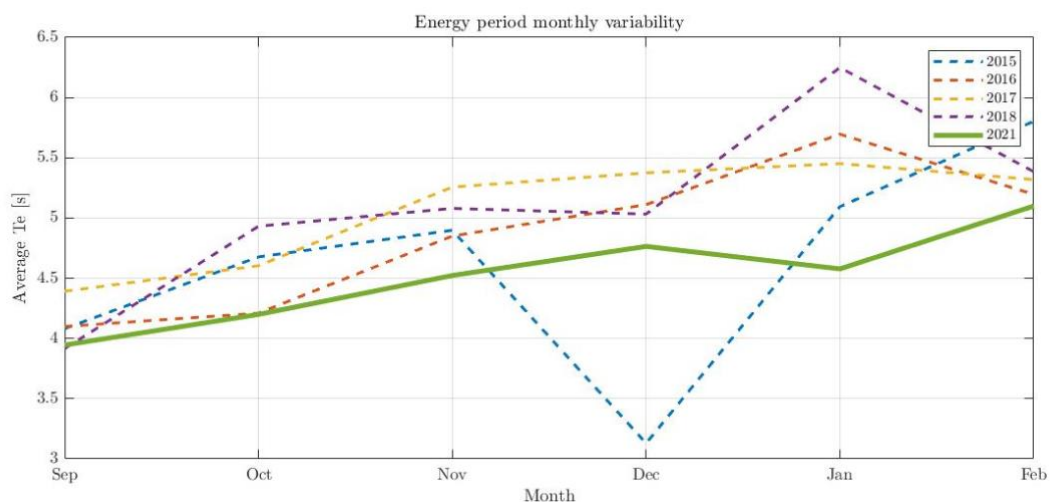


Figura 35 - Variabilità mensile del periodo energetico, considerando sia i dati modellati che strumentali

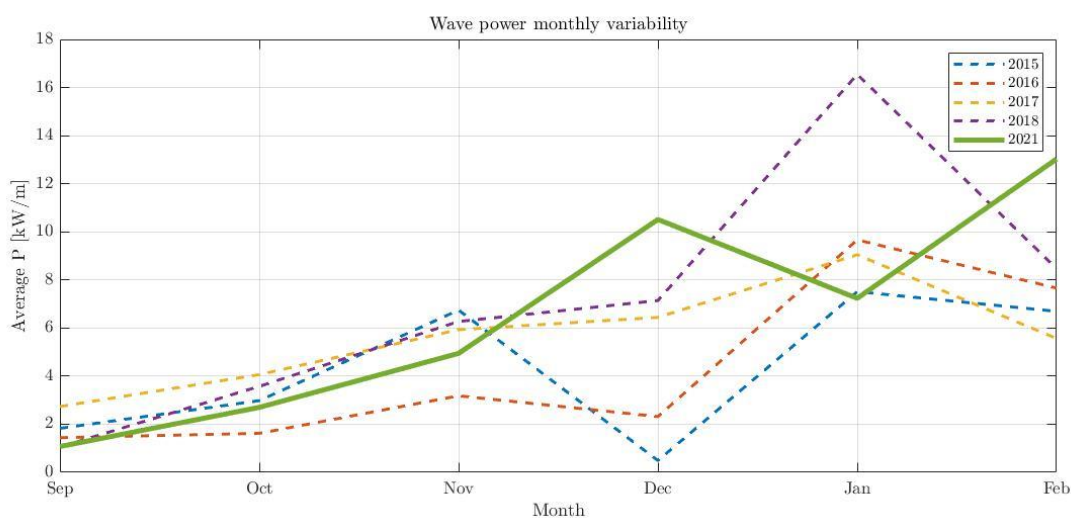


Figura 36 - Variabilità mensile della potenza delle onde, considerando sia i dati modellati che strumentali.

In conclusione, i dati ondametrici simulati sono rappresentativi dei dati sperimentali anche se fanno riferimento ad anni diversi e ad una zona di riferimento leggermente diversa.

8. Isola di San Pietro: ulteriore sito di interesse energetico

Durante il progetto PeWEC oltre all'isola di Pantelleria l'isola di San Pietro nella costa sud-ovest della Sardegna è stata considerata come sito di interesse per l'installazione. I due siti infatti mostrano dai risultati del modello numerico contenuti di energia comparabili. Durante il progetto un primo sopralluogo sull'isola è stato effettuato per identificare gli eventuali punti di interesse per un eventuale installazione del prototipo e l'eventuale allacciamento alla rete elettrica e relativo approdo del cavo elettrico.



Figura 37 Isola di San Pietro.

I siti di interesse sono stati individuate tenendo conto, in breve, dei seguenti criteri:

- Inclusione in aree di tutela naturalistica.
- Inclusione in aree di tutela paesaggistica.
- Inclusione o vicinanza ad aree di pericolosità idrogeologica.
- Batimetria del sito.
- Disponibilità e direzionalità della risorsa moto ondoso.
- Interferenza con attività marittime professionali.
- Interferenza con attività diportistiche.
- Impatto visivo.
- Geomorfologia dell'area costiera.
- Distanza dalla rete di MT e da cabine di trasformazione MT/BT già esistenti.

Dal punto di vista naturalistico, l'isola di San Pietro è interessata da aree SIC, IBA e ZPS. L'analisi dei siti di Rete Natura 2000 è necessaria, in quanto per il rilascio della concessione di area demaniale marittima da parte della Regione Sardegna è d'obbligo produrre un'adeguata valutazione d'incidenza ambientale nonché una relazione paesaggistica, che dimostri che l'intervento non rechi pregiudizio di alcun tipo all'area tutelata. In Figura 38 sono riportati i siti individuati a livello preliminare per un'ipotetica installazione del prototipo PeWEC facente riferimento ai criteri sopra esposti. Inoltre in figura è riportata anche la zona di interdizione dovuta alla presenza delle attività di pesca delle tonnare presenti sull'isola.

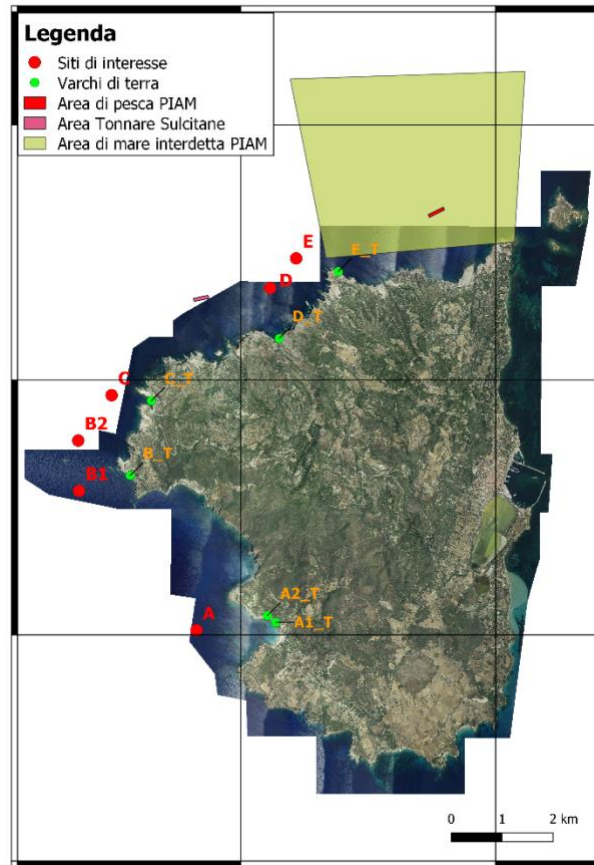


Figura 38 Siti di interesse per un eventuale installazione del prototipo PeWEC presso l'isola di San Pietro.

9. Proprietà del sistema di ormeggio

In questo capitolo vengono descritte le proprietà del sistema di ormeggio e i risultati delle simulazioni condotte con il software dedicato OrcaFlex. La determinazione delle proprietà del sistema di ormeggio è ottenuta per via iterativa e basate su un modello parametrico nella quale i parametri liberi di progetto sono:

- Proprietà delle linee
- Pesi aggiuntivi per le linee
- Proprietà del galleggiante sommerso (detto Jumper)
- Elemento di zavorra aggiuntiva tra Jumper e scafo

Tali proprietà sono state fatte variare iterativamente al fine di verificarne la resistenza in onda estrema e limitando l'influenza dell'ormeggio sullo scafo in onda operativa. Nella sezione seguente viene illustrato il metodo seguito per il dimensionamento del sistema di ormeggio a partire dagli stati di mare estremi identificati nella precedente sezione.

9.1. Metodo di design

Il sistema di ormeggio adottato in questo caso studio è un sistema di ormeggio mono-direzionale, ovvero che non consente l'auto-allineamento dello scafo con l'onda incidente, e ideale per casi di mare fortemente direzionale. L'analisi verte sui seguenti aspetti fondamentali, essenziali nello studio di un sistema di ormeggio per Wave Energy Converter:

- Tensioni alle ancore

- Tensioni ai fairleads
- Offset (moti surge e sway)
- Stabilità dei moti di pitch, roll e yaw

Tra i possibili sistemi di ormeggio si seguirà l'analisi di un sistema di ormeggio con catenarie in acciaio, che utilizza dei jumper per scaricare la parte verticale delle tensioni delle catene e lasciare quindi il dispositivo libero di beccheggiare in stati di mare operativi. Dunque, questo concept di ormeggio è stato pensato per lavorare in due condizioni di lavoro:

- per onde operative dove il dispositivo produce la linea di catena interessata dalla dinamica è prevalentemente compresa fra il jumper e il fairlead dello scafo, con una bassa influenza sulla dinamica dello scafo
- per onde estreme le forze agenti sullo scafo causano movimenti più ampi andando ad interessare la parte di catena e zavorre agiate sul fondale marino, che durante le condizioni operative non viene coinvolta.

Il layout di ormeggio è rappresentato in Figura 39 e 30 e consiste in 4 linee di ormeggio realizzate da ancore che lavorano a drag (*drag anchors*), catene in acciaio, elementi di zavorra in calcestruzzo e jumper. Per questo tipo di ormeggio la rigidità del sistema è di tipo gravitazionale dato dal peso delle catene.

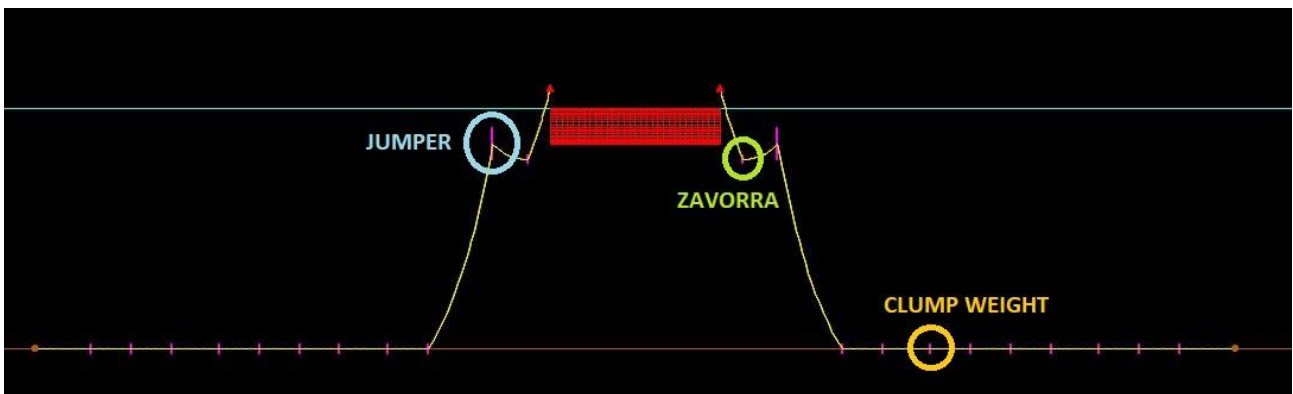


Figura 39 - Configurazione sistema di ormeggio.

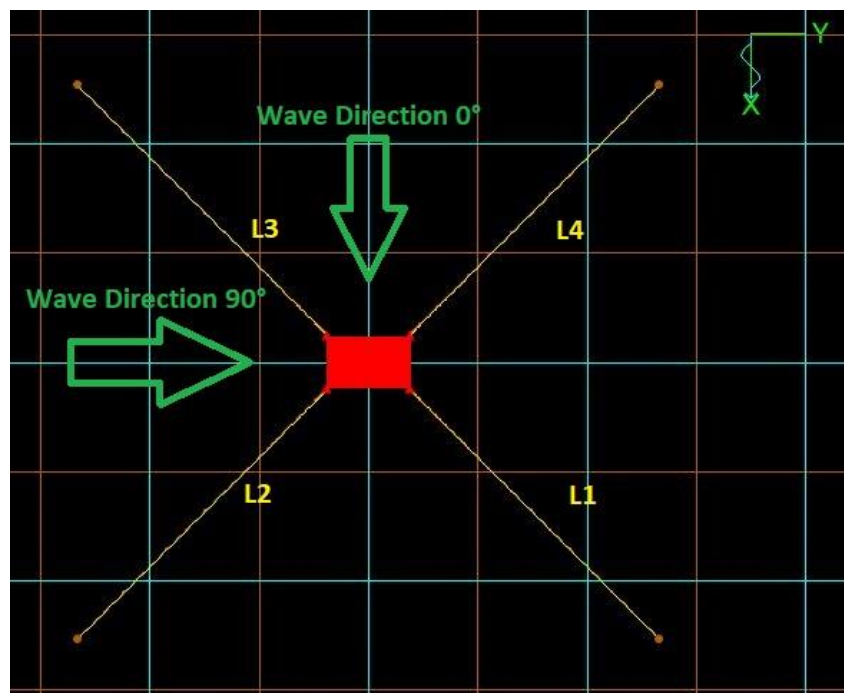


Figura 40 - Mooring system layout.

Sono state considerate diverse taglie per le catene riportate in Tabella 7 in modo da analizzare come variano le forze al variare della rigidità aggiuntiva prodotta dal peso delle catene.

Tabella 7 Proprietà catene considerate.

	d [mm]	w [kg/m]	d_eq [mm]	EA [kN]
Chain_080mm_studless	80	140	0.1512	646.4e3
Chain_100mm_studless	100	199	0.18	854.0e3
Chain_125mm_studless	125	310	0.225	1334.4e3
Chain_150mm_studless	150	448	0.27	1921.5e3

Sono stati quindi costruiti 3 modelli:

- Modello senza corpi morti
- Modello con 6 corpi morti
- Modello con 9 corpi morti

Per ogni modello è stata fatta variare la tipologia di catenaria (vedi Tabella 7). In Figura 31 sono presenti, ad esempio, i risultati dei vari modelli in termini di tensione di sollevamento all'ancora. Dopo aver analizzato l'influenza delle varie catene si è scelto di procedere con la catena caratterizzata da d=150 mm, in quanto garantisce le condizioni più favorevoli in termini di *anchor uplift*, forze di ritorno e resistenza delle linee. Per tale motivo le configurazioni presentate nel seguito saranno caratterizzate da questo tipo di linea.

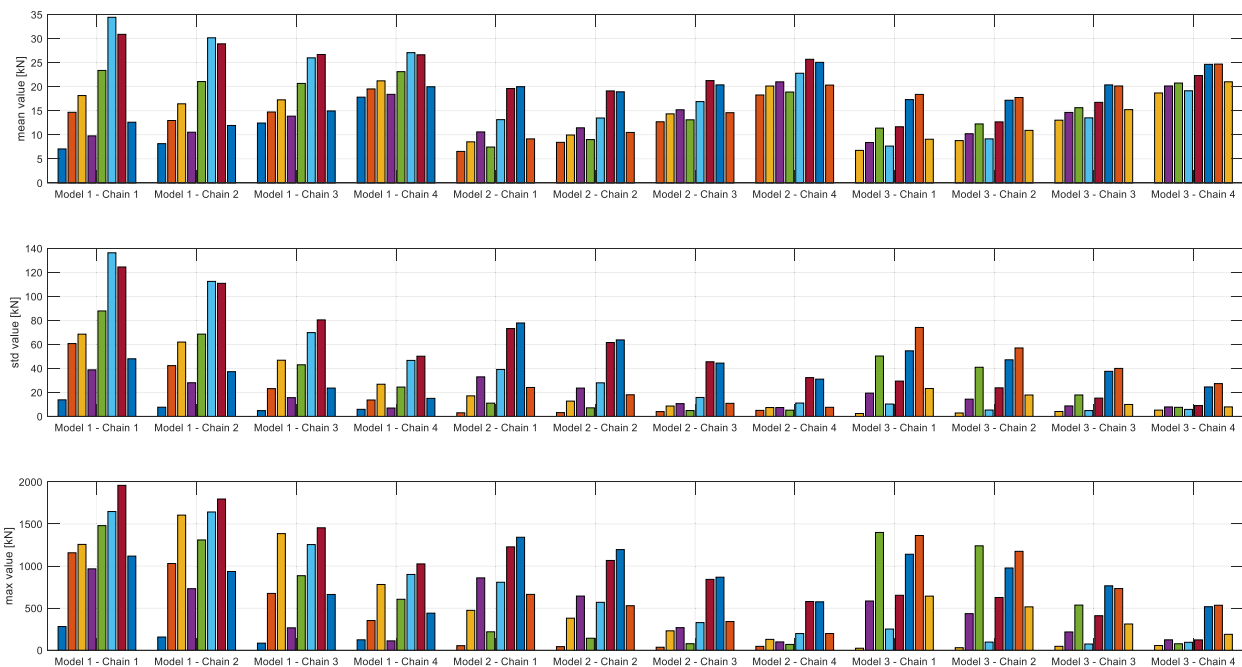


Figura 41 - Andamento della tensione di sollevamento all'ancora tra i modelli con diversa catenaria.

La configurazione di ormeggio adottato, scelto dopo un procedimento iterativo di selezione, presenta le seguenti caratteristiche:

Tabella 8 - Proprietà di jumper e clump-weight.

Attachments Properties Full Scale Model

	Mass [kg]		N per linea	Volume [m3]	NB [kg]	Drag area [m2]
Jumper	5200		1	23.7	19092.5	17
Clump-Weight	10000		9	0.5	-9487.5	/
Moschettoni		4	/	/	/	
Zavorra	12857	1	/	-12857	/	

Tabella 9 - Proprietà della catenaria scelta.

Chain Properties Full Scale Model

	Lunghezza [m]	w [kg/m]	d [m]	EA [kN]
Chain 150mm	121.5	448	0.27	1.92E+06

La lunghezza totale della linea risulta essere di 121 m con un anchor radius di 110 m. I risultati mostrati in Figura 31 sono relativi a 42 stati di mare scelti dall'Environmental Contour partendo da un periodo leggermente inferiore a quello di risonanza fino a quello corrispondente all'onda con Hs massimo. I risultati mostrano che la tensione di sollevamento alle ancore è dell'ordine di 10 ton (Fig. 32), dunque relativamente basso. Le tensioni ai fairlead in Figura 33 sono invece molto più consistenti, a causa delle inerzie in gioco.

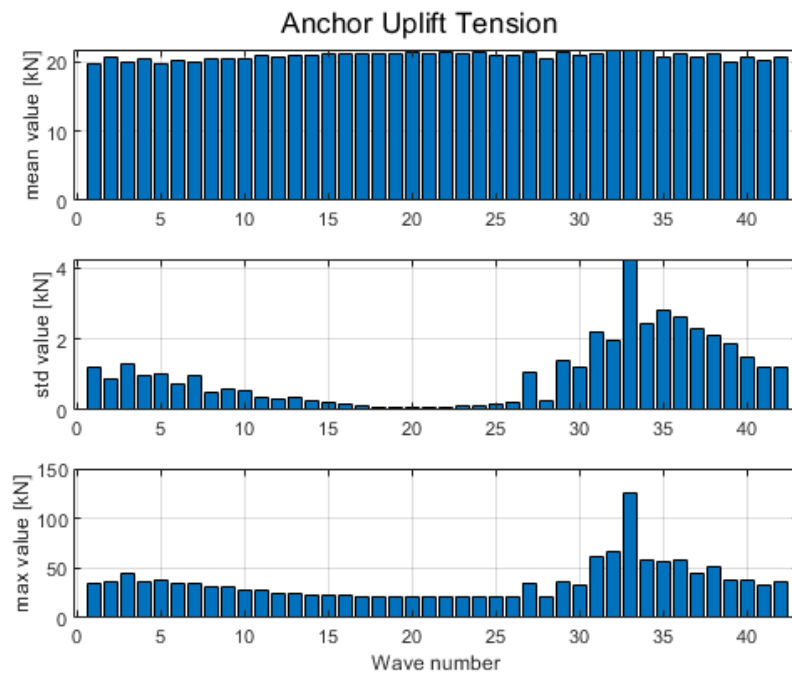


Figura 42 Tensione di sollevamento dell'ancora

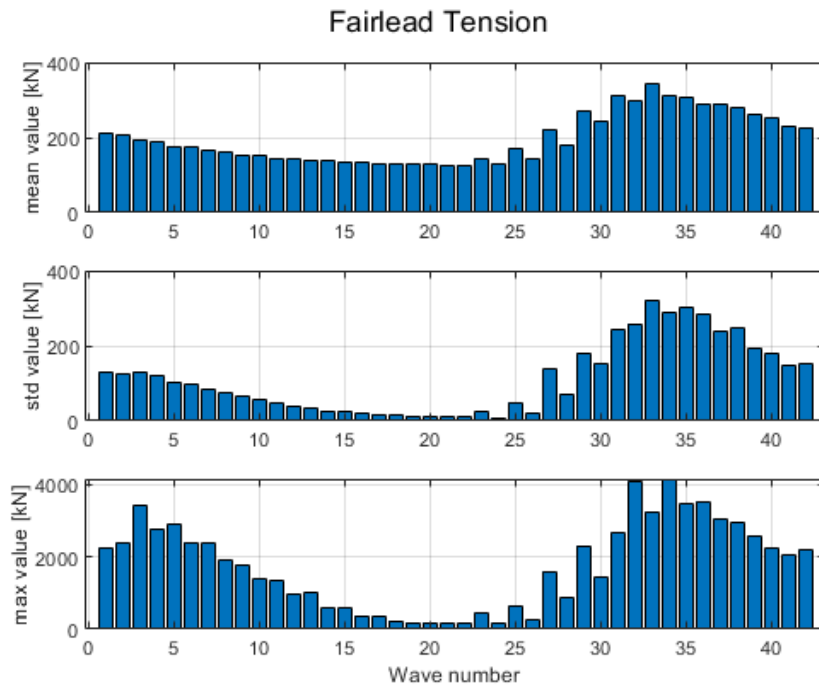


Figura 43 Tensioni alle Fairlead.

10. Definizione della funzione di costo

Nella seguente sezione si valuteranno in maniera preliminare e in assenza di reali preventivi i costi per i vari componenti costituenti il sistema di ancoraggio, del cavo elettrico e del dispositivo, quindi suddiviso in scafo e unità di trasmissione interna (comprensiva del Power Take-Off e dei sistemi elettrici). Le funzioni di costo sono state ricavate partendo da pubblicazioni scientifiche e progetti pubblici. Per una valutazione veritiera dei costi saranno necessarie le dovute indagini di mercato soprattutto per quanto riguarda componenti commerciali come riduttore, ausiliari elettrici, cuscinetti per i quali non è possibile trovare delle funzioni di costo in letteratura. Questo lavoro di definizione dei costi sarà molto utile durante una futura iterazione e ottimizzazione del dispositivo PeWEC con la possibilità di adottare anche diverse modalità realizzative dei sistemi pendolo, scafo e ormeggio i quali impattano significativamente sui costi del dispositivo.

10.1. Funzioni di costo dello scafo

Lo scafo è in acciaio ma all'incirca il 20% del suo peso consiste in una serie di componenti dediti al fissaggio delle componenti dell'unità di trasformazione, le ante di accesso alle cabine interne, i sistemi di segnalazione, gli stopper del sistema di ormeggio, i fairleads e la pittura dello scafo.

Il costo dell'acciaio per lo scafo è calcolato facendo riferimento a [11], dove è espressa una relazione in funzione delle dimensioni dello scafo stesso. In particolare, nel modello proposto si considera come il costo per chilogrammo di scafo cresce al diminuire del coefficiente LBD ($LBD = \text{Length, Beam, Draft}$), dato per l'appunto dal prodotto tra la lunghezza, la larghezza e l'affondamento dello scafo stesso. Partendo, quindi, dal valore medio proposto in [11], questo è stato scalato considerando un coefficiente di LBD pari a quello dello scafo proposto.

Lo scafo, come spiegato, è anche composto da accessori per il fissaggio del gruppo di trasformazione dove viene alloggiato il pendolo, così come ante per l'accesso ai vari vani dello scafo. Per il calcolo di tale costo, si è fatto riferimento alle voci per l'allestimento e le spese generali (inclusa la progettazione del processo) proposte in [11]. Considerando che tali accessori giungono a pesare, all'incirca, il 20% del peso totale complessivo del sistema scafo, partendo dalle metriche

proposte nello stesso [11], si giunge ad avere un'ulteriore spesa totale di 3 €/kg per accessoriare opportunamente lo scafo.

Il costo della zavorra è ottenuto consultando [12]. Nel report in questione si riporta il costo del calcestruzzo e del cemento armato. Considerando che quest'ultimo costituisce all'incirca il 15% del peso totale, si ottiene un totale di 0,10€/kg come metrica costo per la zavorra dello scafo. La seguente tabella, quindi, riassume i costi proposti per lo scafo in acciaio, facendo riferimento alla massa dello scafo in acciaio (kg_{scafo}) e la mazza della zavorra per aggiunta allo scafo ($kg_{zavorra}$).

Tabella 10 - Funzione di costo scafo.

Acciaio Scafo	4 €/kg _{scafo}	[12]
Componenti accessorie scafo	3 €/kg _{scafo}	[12]
Zavorra	0,10 €/kg _{zavorra}	[13]

Volendo quindi definire un'equazione per il costo complessivo dello scafo C_{scafo} , considerando uno scafo di massa strutturale pari a $M_{scafo}(kg)$ e una massa di zavorra pari $M_{zavorra}(kg)$, si ottiene:

$$C_{scafo}(\text{€}) = M_{scafo}(kg) \cdot 7 \frac{\text{€}}{kg} + M_{zavorra}(kg) \cdot 0.1 \frac{\text{€}}{kg}$$

10.2. Funzioni di costo dell'unità pendolo di conversione

L'unità pendolo di conversione consta del Power Take-Off, la componentistica elettronica, i cuscinetti, la struttura di supporto e raccordo e, infine, il pendolo. A queste componenti si deve aggiungere il costo per l'assemblaggio, equilibratura, testing, verniciatura e collaudo.

Il costo del PTO è stato valutato basandosi sui valori proposti da [13], che analizza il caso di un PTO idraulico per Pelamis. Di tutti i valori proposti ed analizzati, sono stati considerati quelli concernenti le componenti riguardanti il sistema in esame, e quindi principalmente legati al sistema di trasmissione secondario. Interpolando sui vari valori si è ottenuto un valore prossimo ai 4 €/kg_{unità}.

Al valore del PTO, si aggiunge tutta la parte elettronica. Per la valutazione dei relativi costi, si è considerato [14] ed in particolare le voci legate alle connessioni elettriche, sensori, e trasformatori. Considerando il pendolo di PeWEC, ed eseguendo i vari calcoli per l'unità lì proposta, si ottiene un costo pari a 4,5 €/kg_{unità}.

Il costo del pendolo e delle strutture di supporto è stato calcolato pesando i costi per le componenti che richiedono lavorazioni meccaniche di precisione [14] con quelli di carpenteria civile [15]. Si considera ora che il pendolo è composto per l'85% da componenti assimilabili, in termini di difficoltà di lavorazione, alle lavorazioni da carpenteria civile, e costituisce, all'incirca il 70% della massa totale dell'unità di trasmissione. Nel caso delle componenti di supporto, invece, le componenti assimilabili alla carpenteria civile sono pari al 40%, e la massa di queste componenti è pari al 20% del peso totale dell'unità. Da quanto detto segue che, nel caso del pendolo, si ha un costo specifico di 4,0€/kg, che se riferito alla massa dell'unità giunge a 3,0€/kg_{unità}, mentre nel caso delle strutture di supporto si giunge ad avere un costo di 8,0€/kg, pari a 1,5€/kg_{unità}.

Per quanto concerne i cuscinetti e l'albero si è assunto un valore di insieme, proposto in [14], per l'accoppiamento in questione. Considerando che questa voce, in termini di massa, è pari al 5% della massa totale dell'unità di trasmissione, si ottiene un valore pari 1 €/kg_{unità}, suddivisibile in 50%-50% tra le due voci.

Infine, per quanto concerne le voci di assemblaggio, verniciatura e collaudo, lo stesso studio suggerisce di assumere un valore pari al 10%-15% dei costi in precedenza assunti. A tutte le analisi di costo proposte, la seguente tabella segue, riassumendo quanto spiegato in questo paragrafo.

Tabella 11 - Funzione di costo PTO.

Componenti elettroniche (sensori, trasformatori, etc.)	3,5-5,0 €/kg _{unità}	[14]
Power Take-Off (PTO)	4,0 €/kg _{unità}	[13]
Albero	0,5 €/kg _{unità}	[14]
Cuscinetti	0,5€/kg _{unità}	[14]
Assemblaggio, equilibratura, testing, verniciatura e collaudo	1,0 €/kg _{unità}	[14]
Strutture supporto e raccordo	1,5 €/kg _{unità}	[14], [15]
Pendolo	3,0 <i>unità</i>	[14], [15]

Considerando, quindi, l'unità di trasmissione di massa $M_{\text{unità}}(\text{kg})$, comprensiva del pendolo, dell'albero, dei sistemi di supporto meccanici ed elettronici, il costo finale ($C_{\text{unità}}$) è espresso come:

$$C_{\text{unità}}(\text{€}) = M_{\text{unità}}(\text{kg}) \cdot 15 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$$

10.3. Funzioni di costo del sistema di ormeggio

Il sistema di ormeggio consta di differenti linee, ognuna delle quali, partendo dall'estremità ancorata, vede una serie di corpi morti e jumper. La linea è costituita da una catenaria con diametri variabili, però alcuni tratti possono essere realizzati con materiali sintetici quali poliestere o nylon. Un'altra alternativa consiste nell'adozione di funi metalliche.

Il costo dell'ancora è stato stimato partendo da [16], dove son riportati i costi per sistemi di ancoraggio di tipo "drag embedded", con vari rapporti (adimensionali) tra la capacità di presa (in tonnellate) e massa "a secco" dell'ancora stessa. Considerando ancore con valori di tale rapporto minori di 50, si giunge ad avere una metrica di costo pari a 2,6 €/kg. Tale valore, in [16], è riferito ad un'ancora "Stevpris Mk5", i cui valori di funzionamento, ossia la capacità di presa per i vari modelli, sono riportati nel grafico in figura 11. Differentemente, [17] propone la comparazione tra vari modelli di ancora, assumibili, all'incirca, con prezzi normalizzati sulla "massa a secco" molto simili. Tale comparazione, sintetizzata in figura 12, mostra come le applicazioni maggiormente diffuse raggiungano valori di rapporto caratteristico massimali all'incirca di 20.

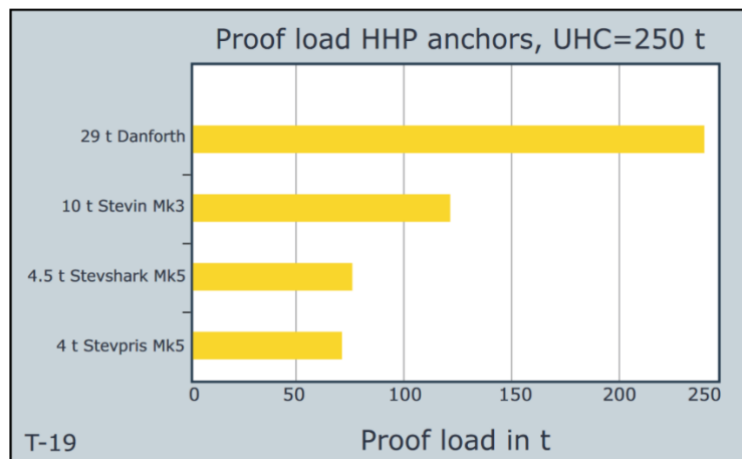


Figura 44 Comparazione tra differenti ancore di tipo "drag". Fonte: [17].

The Stevpris® Mk5 anchor drag and penetration chart

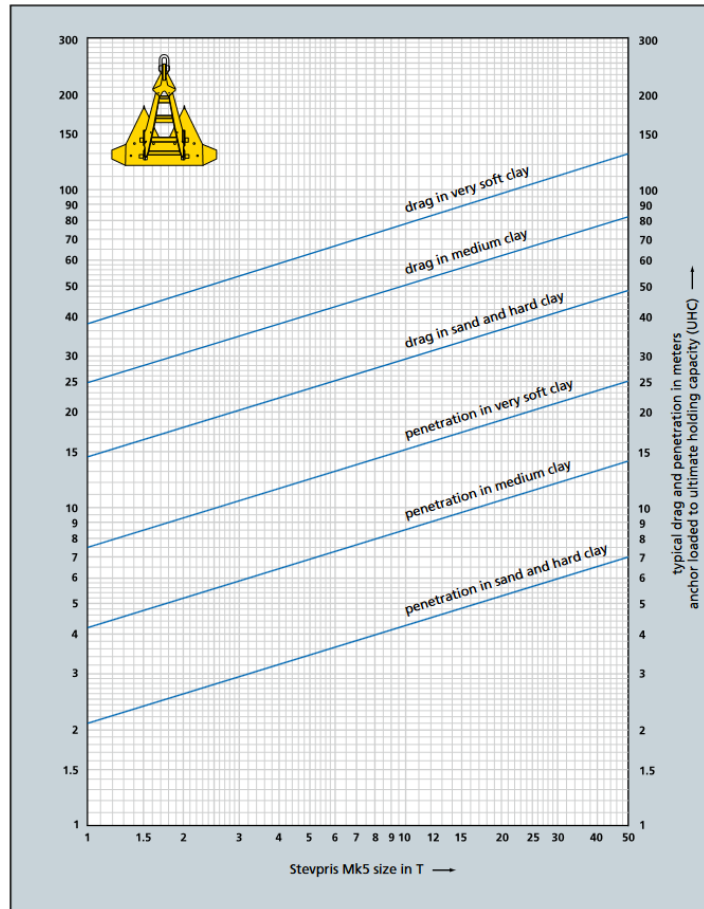


Figura 45 Grafico riportante l'holding capacity delle ancore di tipo "drag" per il caso di una Stevpris Mk5 (fonte: [17])

Volendo comparare la soluzione proposta con un ancoraggio di tipo "screw", si è considerato il costo proposto da [18], ossia 30 €/kg. Si noti che il prezzo proposto è riferito ad una sola applicazione, in cui sono installate 4 ancore con massa "a secco" complessiva di 1200 kg. Il costo dell'installazione è fortemente influenzato dai tempi per le operazioni ([18] considera un giorno per ancora), con supporto di mezzi altamente specifici (aROV) e quindi costosi, sia in termini di spese dirette che indirette (operatori). Tale costo [18] è pari a circa il 40% del costo delle ancore stesse.

Nel caso delle ancore di tipo "suction" il costo del materiale varia attorno i 10 €/kg, come riportato da [18], [19]. I 2 casi considerati riguardano ancoraggi per una massa totale, rispettivamente, di 140 e 150 t, ed una capacità di presa di circa 700 t. Si consideri che nel caso delle ancore di tipo "suction" non è sensato legare la capacità di ancoraggio alla massa "secca" dell'ancora stessa, come invece è stato fatto in precedenza per le "drag embedded". In questo caso, le ancore hanno sempre forma cilindrica, con una densità quasi costate e una complessità di realizzazione, altresì, molto bassa: tutte queste considerazioni, come espresso in [20], portano a concludere che la capacità di ancoraggio può essere caratterizzata, unicamente, dalle dimensioni geometriche dell'ancora stessa (principalmente lunghezza e diametro) e le condizioni del fondale dove si opererà (che può essere dall'argilloso al puro sabbioso). [20] relaziona ognuna delle dimensioni caratteristiche alla capacità di ancoraggio con equazioni del tipo:

$$L = a \cdot C_{anc}^b$$

dove L è la dimensione caratteristica dell'ancora che si vuole calcolare, C_{anc} è la capacità di ancoraggio, mentre a e b sono i fattori dipendenti dalle dimensioni del fondale e variano, anche, in base alla dimensione caratteristica che si vuole calcolare, ma sono tabellati per modello di ancora.

Analizzando i tempi di installazione, [25] e [19] considerano per le ancore di tipo “suction” il 50% in più delle ore che sono necessarie per un sistema “equivalente” con “drag embedded”. In particolare, se sono assunte 8 ore di installazione per ancoraggio con Stevshark Mk5 da 17 t, 12 ore sono state considerate per la penetrazione nel fondo delle ancore di tipo “suction”.

Nel caso delle ancore di tipo “plate”, varie soluzioni, con differenti principi di funzionamento, possono essere proposte. In questo studio si vuole considerare una soluzione che in parte sfrutta il principio di funzionamento delle ancore di tipo “suction”, ossia le “suction embedded plate anchor” (SEPLA) [21]. Come riportato in [22], le ancore di tipo SEPLA pesano il 25% delle analoghe di tipo “suction”, riducendo i costi complessivi del sistema di ancoraggio a 2,5 €/kg. Il costo è riferito ad un'ancora di 24t e la metrica di costo proposta risulta valida nell'intorno di tale intervallo (15-35 t). [21] rappresenta le equazioni per una prima descrizione della capacità di ancoraggio: questa risulta essere proporzionale composta da due addendi, di cui uno proporzionale all'area del piatto dell'ancora, il secondo proporzionale al quadrato della larghezza. Infine, [25] riporta un costo di installazione approssimabile a quello delle ancore di tipo “drag embedded”.

2 differenti progetti [16] e [23] sono stati considerati per identificare il prezzo delle catene ed entrambi gli studi propongono valori molto simili, il cui valore medio è pari a 1,5 €/kg. Inoltre, interpolando le soluzioni proposte dal catalogo [23], si è giunti ad avere una correlazione diretta tra il diametro nominale della specifica catenaria e la relativa densità lineare (ρ). L'input di tale relazione, che segue, è il diametro, espresso in millimetri, ottenendo un risultato in kg/m.

$$\rho \left(\frac{kg}{m} \right) = 0,0219 \cdot x^2$$

Tale relazione risulta valida per un ampio range di diametro, ed in particolare da valori attorno i 40 mm fino ad oltre 120mm.

[16] propone una funzione di costo per i jumper, pari a 20 €/kg_{jumper}, riferendosi alla massa netta del dispositivo. Tuttavia, analizzando per la boa stessa il coefficiente di spinta normalizzato sul volume suo volume, si nota che questa presenta caratteristiche che la inquadrano di elevata fattura, se paragonata, ad esempio a quella proposta da [24]. Quest'ultima, infatti, come livello di manifattura ed efficienza volumetrica, è molto più simile al tipo di massa di spinta usata, tipicamente, nei sistemi di ormeggio proposti in questo studio. Il costo di 20 €/kg è stato scalato sulla base del rapporto delle efficienze volumetriche, ed è stato quindi normalizzato sulla spinta netta fornita dal jumper riportato in [24]. Il valore finale di 1.025 €/kg_{SN} è stato quindi definito. Si noti che tale valore è da ritenersi valido per jumper in grado di fornire una spinta netta teorica che può variare da 3000 fino a 20000 kg, ma è importante che il rapporto tra la spinta netta e il volume sia comparabile con quello suggerito da [24], ossia pari a 650 kg_{SN}/m³.

Volendo inquadrare il costo delle corde in poliestere, si considera il valore proposto da [16], ossia pari a 9,0 €/kg. Tale valore è riferito ad una corda con densità lineare pari a 10,6 kg/m e un diametro di 125 mm. A seguito di comparazioni con altri studi, come ad esempio [25], si conclude che, come valore, è da ritenersi valido fino a 15 kg/m di densità lineare.

Nel caso del nylon si è considerato il valore proposto da [25], che è stato scalato prima tenendo conto che si vuole utilizzare un cavo 8 spiral strands, per poi scalarlo nuovamente sulla base di un coefficiente ottenuto dal rapporto delle ‘efficienze’ delle corde comparate, pari al carico di rottura diviso per il prodotto tra la densità del cavo stesso e la sua sezione. In particolare, [25] propone un cavo con diametro pari a 115 mm, un carico di rottura di 4500kN e una densità di 11,35 kg/m. Il valore finale che si ottiene è pari a 155 €/m, ed è quindi da considerarsi valido per una corsa con un diametro all'incirca pari a 90 mm, un carico di rottura pari a 1280 kN e una densità di 4,8 kg/m. Da quanto detto, segue che sotto le ipotesi espresse si ha anche un costo normalizzato sul peso pari a 33,0 €/kg.

Per quanto concerne la fune metallica si è adottato il valore proposto da [16], pari a 5,5 €/kg. Si noti che tale valore, è valido per valori di densità lineare pari a 22,0-25,0 kg/m, con diametri della fune attorno i 70-90mm, giungendo ad avere, equivalentemente, un costo unitario per metro di lunghezza della fune pari a 125 €/m.

Focalizzando la quotazione dei grilli meccanici e delle piastre trilobate si fa riferimento a quanto riportato da [16]. In particolare, per le piastre si propone un valore normalizzato sulla massa ed uno sul carico di lavoro utile (CLU), pari, rispettivamente, a 5,5 €/kg e 8,0 €/t_{CLU}. I valori, calcolati per applicazioni con un carico di lavoro utile di 1500 kN, retti con piastre da 256 kg, sono validi per un range molto ampio, al punto tale che lo stesso [16] propone la metrica come fissa. Infine, per quanto concerne i grilli meccanici, lo stesso [16] propone 6 €/kg, mentre, per ottenere la funzione

normalizzata sul carico di lavoro utile, è proposta una linearizzazione su 23 casi studio. L'equazione che esprime la relazione tra costo su carico di lavoro utile (y , in €/t_{CLU}) e il carico utile di lavoro (x) stesso è pari a

$$y \left(\frac{\text{€}}{t_{CLU}} \right) = 0,020 \cdot x (t_{CLU}) + 1,6$$

Si precisa che i valori di funzioni di costo riportate per i grilli e le piastre risultano validi per componenti con un carico di lavoro utile fino a 200 t, in quanto questa è l'estensione del campione fornito da [16], su cui si è interpolato. Si noti, inoltre, con valenza di controllo incrociato, la percentuale del costo di grilli meccanici e piastre trilobate, deve corrispondere all'incirca al 10-20% del costo totale del sistema di ormeggio [26].

Il costo dei corpi morti è valutato considerando [27], ed in particolare mediando tra il costo del calcestruzzo e del cemento armato. Considerando che la massa del calcestruzzo costituisce il 60% del totale per ogni corpo morto, si giunge ad un valore finale di funzione di costo pari a 0,15 €/kg. Tale valore, considerando la ripetibilità nell'uso della forma di colatura, non presenta limiti di applicabilità; è quindi indipendente dal volume progettato per i corpi morti.

Tabella 12 Funzioni di costo relative al sistema di ormeggio.

Ancora "drag embedded"	2,6 €/kg	[7]
Catenaria	1,5 €/kg	[7], [8]
Jumper	1.025 €/kg _{SN}	[7], [11]
Cavo poliestere	9,0 €/kg (130 €/m con 14,0 kg/m)	[7], [10]
Cavo nylon	33,0 €/kg (155 €/m con 4,8 kg/m)	[10]
Cavo metallico	125 €/m (5,5 €/kg)	[7]
Piastra trilobata	6,0 €/kg	[7]
Grilli meccanici	5,5 €/kg (8,0 €/t _{CLU})	[7]
Corpi morti	0,15 €/kg	[2]

Volendo ora riassumere tutte le proposte metriche di costo per il sistema di ormeggio C_{orm} (kg) in un'unica formulazione, si ottiene:

$$C_{orm} = M_{anc} \cdot 2,6 \frac{\text{€}}{\text{kg}} + M_{cat} \cdot 1,5 \frac{\text{€}}{\text{kg}} + SN_{jum} \cdot 1025 \frac{\text{€}}{\text{kg}} + L_{cav.m} \cdot 125 \frac{\text{€}}{\text{m}} + M_{pt} \cdot 6 \frac{\text{€}}{\text{kg}} + M_{gm} \cdot 5,5 \frac{\text{€}}{\text{kg}} + M_{cm} \cdot 0,15 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$$

SN_{jum} è la spinta netta totale fornita dai jumper (in chilogrammi), $L_{cav.m}$ è la lunghezza totale dei cavi metallici (in metri), e tutti i coefficienti in M stanno per le varie masse (espresse in chilogrammi) rispettivamente delle ancore (anc), delle catenarie (cat), delle piastre trilobate (pt), dei grilli meccanici (gm) e dei corpi morti (cm).

10.4. Funzioni di costo del cavo elettrico

Il costo del cavo elettrico è stato quotato considerando i valori proposti da [16], che propone costi comprensivi dell'installazione pari a 350-700 €/m. Si noti che tale variazione nella metrica di costo è giustificata dalle varie possibili taglie di potenza nominale del cavo e dalle difficoltà riscontrabili nell'installazione del cavo. Ad esempio, il costo di un cavo da 11kW, installato su un fondale regolare, corrisponde ad un costo di 400 €/m. 700€/m, di contro, corrisponde al caso di un cavo da 80 kW. Volendo scorporare i costi di per il solo cavo elettrico dalle restanti voci inerenti all'installazione, progettazione e spese accessorie varie, si possono applicare le percentuali riportate da [28] ai totali

proposti. Considerando, quindi, un cavo di minore potenza (all'interno del range di possibili valori proposto), si ottiene un costo per il solo cavo pari a 150 €/m.

11. Procedure di costruzione e installazione

L'installazione del dispositivo consta, principalmente, di due fasi:

- La disposizione del sistema di ormeggio
- Il posizionamento e l'aggancio del WEC

Tali attività, in termini di tempo necessario per le operazioni, personale e mezzi impiegati è fortemente variabile, in dipendenza del tipo di installazione, le dimensioni del dispositivo, del sistema e tipo di ormeggio, dalle condizioni meteorologiche e dal luogo di installazione e, quindi, dalla disponibilità di aziende con mezzi e personale qualificati per le operazioni necessarie.

Fissati questi elementi di variabilità, si propongono le procedure necessarie per un'installazione ad una profondità di 40 m circa, considerando una disponibilità di risorse in mezzi e personale riscontrabili nel contesto del Mediterraneo. Le funzioni di costo proposte sono ad un livello di dettagli che risulterà utile nel momento in cui sarà implementabile una procedura per la messa in opera dell'impianto. Tuttavia, al momento, si ritiene opportuno seguire quanto indicato da [29], che considera un costo pari al 15% del CapEx.

11.1. Durata delle operazioni.

Le procedure per la sistemazione dell'ormeggio consistono nella disposizione delle ancore e dei corpi morti. I tempi di disposizione delle ancore dipendono dal tipo di ancora. [19] indica che per ancore di "drag embedded" le operazioni richiedono 8 ore all'incirca, in condizioni di mare non mosso. Per ancore che richiedono un meccanismo di affondamento completo nella sabbia, ovvero per le "suction" o "screw", il tempo di installazione si allunga a 12 ore. Le catenarie sono rilasciate con una velocità all'incirca pari a 0,15 m/s, come riportato in [30]. Come riportato in [31], i corpi morti richiedono 30 minuti cadauno per essere posizionati, i jumper 3 ore per posizionamento e connessione alla linea principale e, infine, la connessione della linea al dispositivo richiede 30 minuti ulteriori di operazioni. Facendo riferimento a quanto riportato in [31], il monitoraggio di ognuna delle componenti principali richiede 30 minuti di operazioni da parte dei sub, valore mediamente costante che si tratti dell'ispezione ancora o dei punti di connessione tra i differenti elementi. Il posizionamento del dispositivo consiste nel rimorchiarlo fino al punto di installazione e, come indicato da [32], tale velocità può variare tra i 0,5 e i 1,5 m/s. Ognuno dei corpi da posizionare, inoltre, così come il dispositivo stesso, richiedono di essere preparati per il trasporto, e quindi di essere posizionati, rispettivamente, sull'imbarcazione atta al trasporto del sistema e in mare per il rimorchio. Tali operazioni, da svolgere tutte con apposita gru, considerando le masse in gioco, necessitano di un'ora di lavoro a terra per componente.

Tabella 13 - Tempi di installazione e posizionamento ancoraggio e WEC.

Procedura	Tempo	Riferimento
Ancoraggio ("drag embedded")	8 ore	[19]
Ancoraggio ("screw", "suction")	12 ore	[19]
Posizionamento catenaria	0,15m/s	[30]
Disposizione corpi morti	30 minuti cad.	[31]
Posizionamento jumper	3 ore cad.	[31]
Punti connessione	30 minuti cad.	[31]

Monitoraggio	30 minuti per comp. ispezionata	[31]
Rimorchio WEC	0,5-1,5 m/s	[32]
Preparazione componenti	1 ora cad.	[31]

11.2. Risorse di mezzi e operatori (con costi).

Le risorse impiegate consistono in 2 operatori subacquei per ora di attività subacquea, ognuno dei quali può operare per un massimo di 3 ore e mezza al giorno, e necessità di un'imbarcazione di supporto. Ovviamente le operazioni sulle differenti linee possono essere svolte in parallelo da coppie di operatori. La preparazione delle componenti per il trasporto sul sito d'installazione richiede il supporto di 3 operatori. Lo stesso numero di unità è, altresì, sufficiente per lo svolgimento delle operazioni a terra e per seguire la disposizione del sistema di ormeggio in mare. Le imbarcazioni da impiegare sono di due tipi: il rimorchiatore e l'Anchor Handler Tug (AHT) che, oltre che di più grande stanza, è dotato di una serie di strumenti per la disposizione dell'ancora, dei corpi morti e delle catenarie. I prezzi di tali dispositivi sono riportati in [5] e corrispondono, rispettivamente, a 7000 € e 23500€ per giornata di affitto del mezzo. Allo stesso tempo, è opportuno precisare che il prezzo dell'AHT è fortemente dipendente dalle dimensioni del mezzo e, quindi, dalle disponibilità delle aziende fornitrici nei pressi dell'installazione da realizzare. In tal senso, ad esempio, potrebbe risultare più conveniente usare un mezzo sovradimensionato rispetto quanto necessario, in base alla flotta disponibile in zona. Con tale precisazione si vuole segnalare l'elevata tipicità dei mezzi necessari. Ad esempio, si consideri che il prezzo proposto di 23500€/giorno di affitto corrisponde ad un mezzo con capacità di tiraggio pari a 200t; andando verso mezzi con valori di capacità di tiro dimezzata, il costo giunge a circa 15000€/giorno [33].

Tabella 14 - Costo orario delle procedure di installazione e posizionamento ormeggio e WEC.

Risorsa	Costo	Riferimento
Operatore subacqueo	90 €/ora	[31]
Imbarcazione di supporto per sub	120 €/ora	[31]
Operatori non subacquei	50 €/ora	[31]
Rimorchiatore	7000 €/giorno	[16], [33]
Anchor Handler Tug (AHT)	23500 €/giorno	[16], [33]

12. Stima preliminare del costo dell'impianto PeWEC

In questa sezione viene computata una stima preliminare del costo della realizzazione di un impianto pilota considerando come caso studio l'isola di Pantelleria. Le funzioni di costo dettagliate e giustificate per mezzo di riferimenti bibliografici sono state applicate per il computo dei costi delle varie voci del CAPEX (Capital Expenditure) dell'impianto PeWEC: scafo, unità di conversione del pendolo, PTO e ausiliari elettronici, sistema di ormeggio, cavo elettrico, installazione, commissioning e decommissioning. Si fa presente inoltre che le funzioni di costo determinate durante la stesura di questo report potranno essere utilizzate in futuro per effettuare delle ottimizzazioni tecnico-economiche della macchina PeWEC per trovare scafi ottimi che minimizzino una stima più puntuale del costo dell'energia. Di seguito vengono descritte le assunzioni mancanti per il calcolo dei costi di alcune componenti non descritte in precedenza.

Per il sistema di ormeggio i componenti dei grilli e delle piastre tribolate sono di difficile valutazione in quanto necessitano di studio strutturale più avanzato. In prima battuta si può supporre in base ai riferimenti degli studi riportati in bibliografica e analizzati nel paragrafo delle funzioni di costo. Per le piastre tribolate si ipotizza un peso pari a 250 kg e quindi circa 1500 Euro al pezzo. Per quanto riguarda i grilli si può ipotizzare in prima battuta il carico massimo registrata all'ancora pari a 2000 kN e pari a circa 200 tonnellate di Carico Limite Ultimo (tonCLU). Per quanto riguarda l'installazione e commissioning dell'impianto PeWEC si fa riferimento a un costo percentuale del 15% rispetto al CAPEX e per quanto riguarda il decommissioning un costo percentuale del 6% rispetto al CAPEX. Per quanto riguarda l'installazione si considerano i costi relativi al trasporto del dispositivo in loco, installazione delle ancore, posa delle linee di ormeggio, aggancio e installazione della macchina all'ormeggio, posa del cavo elettrico, aggancio del cavo elettrico alla macchina e fase di testing successiva all'installazione.

Questi costi sono stimati per la realizzazione di un dispositivo o comunque relativi ad array di dimensioni molto contenute e riferite ad impianti pilota. Quindi questi costi vanno valutati in questo ambito di applicazione e non per valutazioni di scenari industriali o comunque facente riferimento ad una produzione e installazione in larga scala dove i suddetti costi possono subire un'importante diminuzione. La Tabella 15 riporta in dettaglio il costo di tutti i sottosistemi dell'impianto pilota di PeWEC calcolati a partire dalle funzioni di costo e assunzioni prima esposti e dai dati dell'impianto.

Tabella 15 – Stima del CAPEX dell'impianto PeWEC e stima costi dei vari sottosistemi.

Sottosistema	Elemento	Descrizione	Costo (Euro)
Unità di conversione	Massa pendolo	71.5 ton	279000
	Struttura supporto pendolo	21.5 ton	325500
	PTO e elettronica	riferito a peso unità (520 kW)	697500
	totale unità conversione		1302000
Struttura scafo	Costo scafo e fittings	221.8 ton	1552600
Ormeggio	Ancore	70 ton peso all'asciutto	728000
	Catene	121.5 m per linea (densità lineare 448 m)	326592
	Piastra tribolata	1500 euro/pezzo (ipotesi di 250 kg al pezzo)	6000
	Grilli	204 tonCLU	71764
	Corpi morti	16285 kg al pezzo	87939
	Zavorra	12857 kg al pezzo	7714
	Jumper	18561 kg di spinta	76100
	totale ormeggio		1304109

Cavo elettrico	Cavo elettrico	1000 m di lunghezza	150000
Installazione e commissioning		15% del CAPEX	818109
Decommissioning		6% del CAPEX	327244
CAPEX (Euro)	5454062		

In Figura 46, Figura 47, Figura 48, Figura 49 sono riportati i grafici a torta di suddivisione dei costi relativamente a: sistema di ormeggio, dispositivo, impianto e CAPEX. Per quanto riguarda il sistema di ormeggio la voce di costo maggiore è costituita dalle ancore e dalle catene che costituiscono assieme l'80% dei costi associati al sistema di ormeggio. Per quanto riguarda invece il dispositivo metà dei costi sono relativi allo scafo e i suoi elementi ausiliari (verniciatura, attacchi ormeggio, messa in sicurezza, basamento per accomodare l'unità pendolo ecc.) e l'altra metà dei costi è relativa alla struttura meccanica del pendolo più generatore elettrico e elettronica ausiliaria. Nel CAPEX totale invece il costo scafo e suoi ausiliari impatta per il 30% seguito dal sistema di ormeggio (26%), l'unità di conversione (20%) e l'installazione (15%). Il CAPEX totale stimato da un'indicazione preliminare dei costi di progetto di un impianto pilota e la suddivisione delle varie voci di costo. Questo elemento è fondamentale per individuare su quali sottosistemi andare ad operare in un'ottica di riduzione costi futura, che è argomento della prossima sezione.

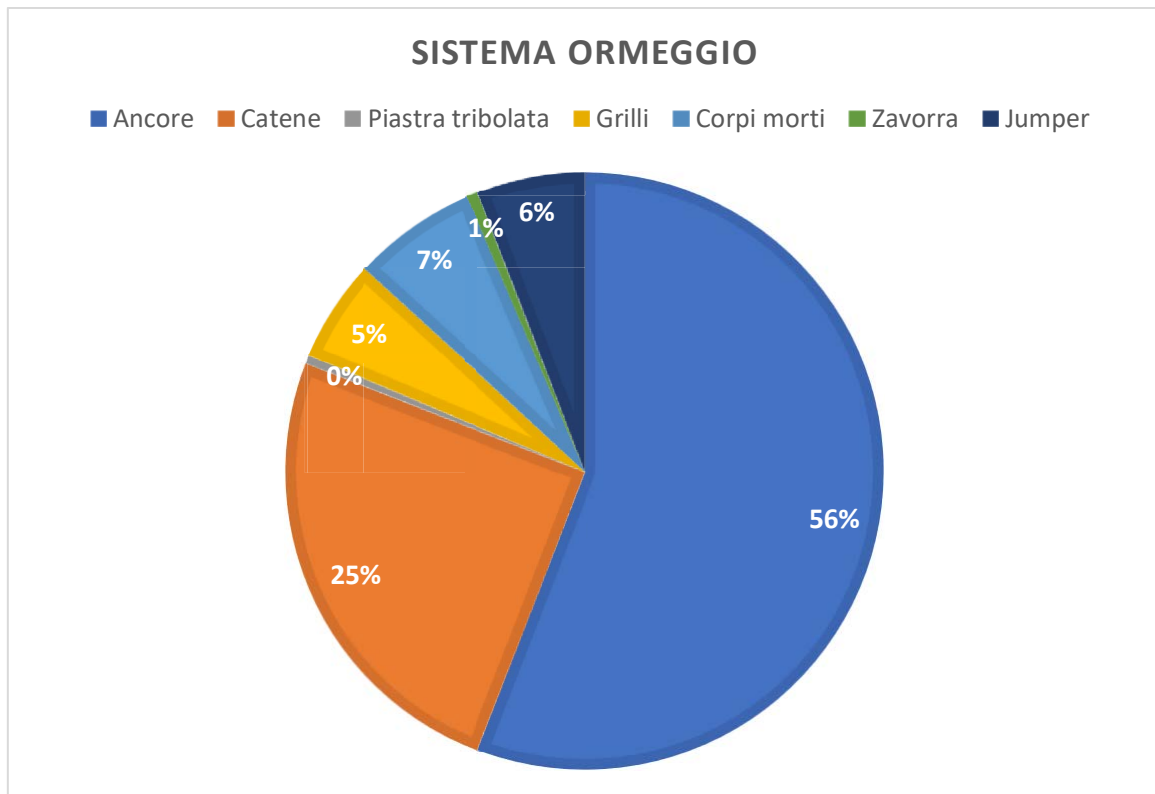


Figura 46 Suddivisione dei costi del sistema di ormeggio.

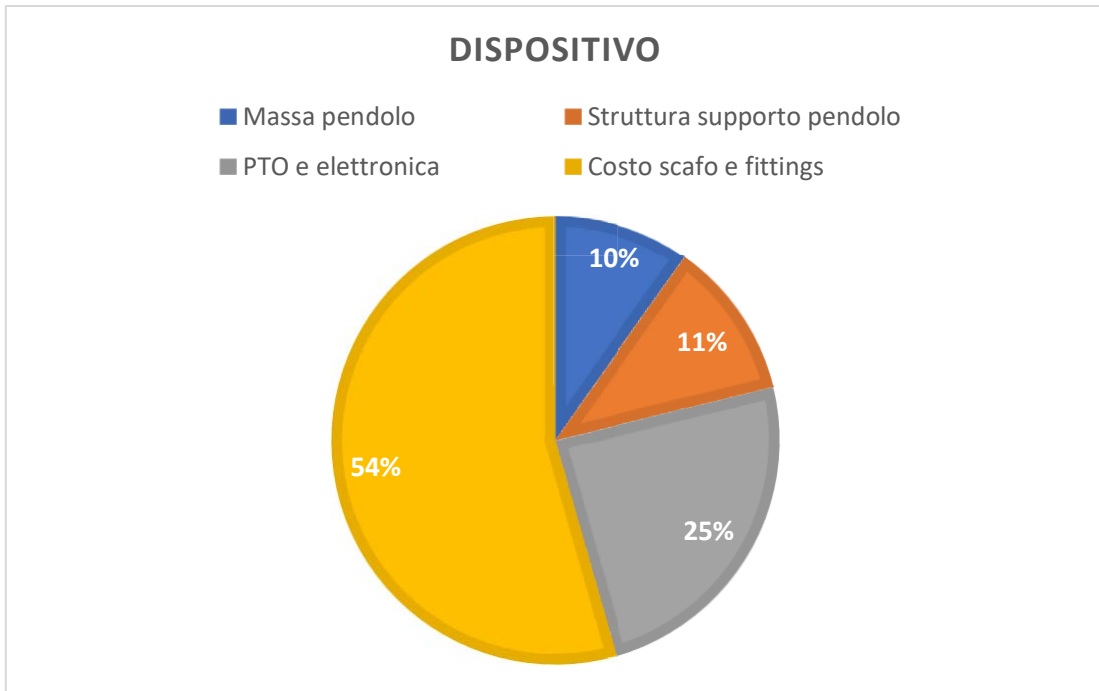


Figura 47 Suddivisione dei costi del dispositivo.

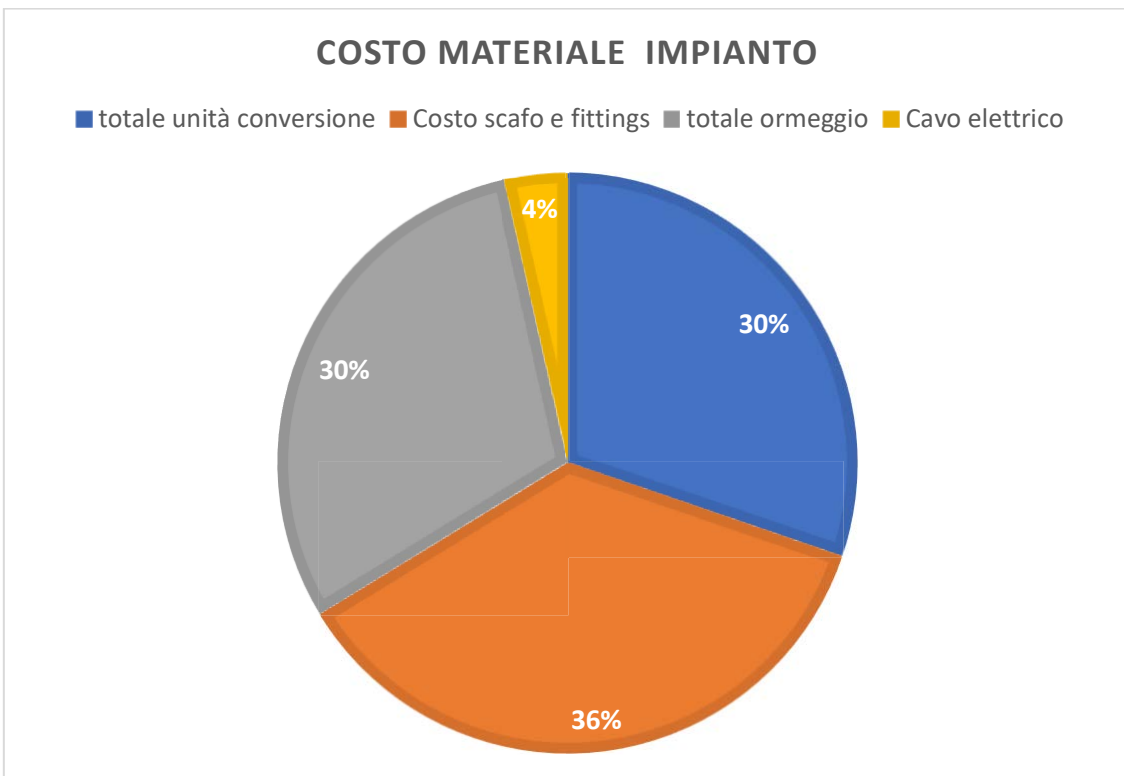


Figura 48 Suddivisione dei costi dell'impianto.

CAPEX

- totale unità conversione
- Costo scafo e fittings
- totale ormeggio
- Cavo elettrico
- Installazione e commissioning
- Decommissioning

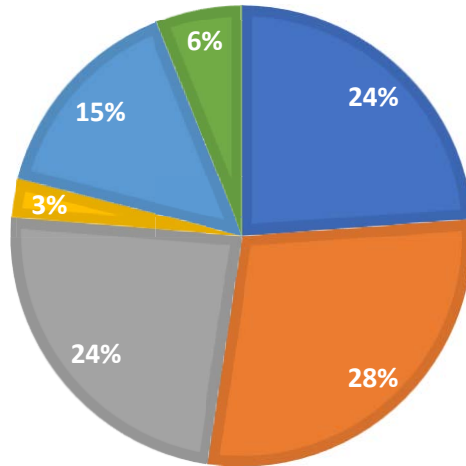


Figura 49 Suddivisione dei costi del CAPEX.

13. Analisi preliminare fattibilità tecnica

In questa sezione vengono discusse preliminarmente gli aspetti di fattibilità tecnica dei sistemi più critici del convertitore PeWEC. La realizzazione dello scafo non presenta criticità realizzative in quanto la realizzazione di scafi in acciaio di forma semplice è arte nota nell'ambito cantieristico navale e la sua progettazione e realizzazione è riferito a precise normative vigenti. Stesso discorso vale per il sistema di ormeggio di cui si è discusso largamente all'interno dei vari report di progetto. Invece il sistema pendolo, essendo il cuore innovativo e di prima conversione dell'energia del moto ondoso presenta aspetti tecnici e costruttivi da considerare in vista di una futura ingegnerizzazione e produzione del dispositivo. Verrà discussa in maniera preliminare anche la componentistica elettrica necessaria per la produzione di energia elettrica adatta all'immissione in rete, ma essendo comunque costituita da componenti commerciali comporta solo future ottimizzazioni di carattere economico e di corretto funzionamento elettrico.

13.1. Analisi soluzioni costruttive del pendolo

L'obiettivo di questo studio è quello di trovare geometrie alternative per il pendolo in modo tale che la dinamica di PeWEC non venga alterata. Per raggiungere questo scopo vengono rispettati dei parametri che permettono al pendolo

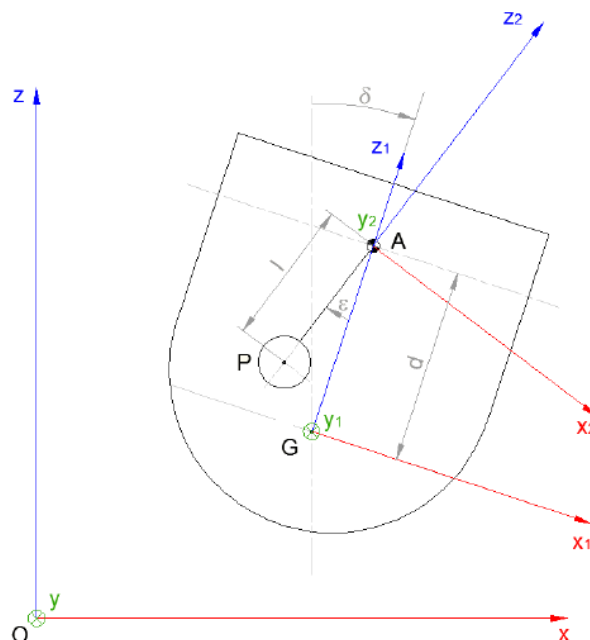


Figura 50 sistema di riferimento e raffigurazione schematica del PeWEC.

di avere caratteristiche geometriche differenti ma con le stesse proprietà inerziali. Infatti, per motivi di semplicità, il pendolo è stato parametrizzato all'interno del tool di ottimizzazione come un semplice cilindro fissato ad una cerniera ipotizzando trascurabile la massa e inerzia dell'asta di attacco. Il pendolo ottimizzato però presenta delle caratteristiche di difficile realizzazione: la larghezza del cilindro è pari a 20.5 e ricopre quasi tutta la larghezza dello scafo e quindi poco pratico per motivi di installazione, realizzazione e problematiche legate alla rigidità flessionale del componente. Dunque, in questa sezione si analizzeranno varianti geometriche per la realizzazione del pendolo, tali però da mantenere invariata la dinamica e massa del sistema pendolo, per variare le proprietà inerziali del dispositivo e le sue caratteristiche produttive.

Per garantire l'equivalenza dinamica delle varie soluzioni di pendoli è necessario garantire che i seguenti parametri siano mantenuti uguali simultaneamente alla soluzione originale:

1. $m_p l$, strettamente connesso alla rigidità statica (a meno dell'accelerazione gravitazionale g), nella seguente trattazione identificato come A.
2. $I_y + m_p l^2$, Inerzia del pendolo rispetto al centro di rotazione, nella seguente trattazione identificato come B.
3. d , distanza fra CoG scafo e cerniera pendolo.
4. L_{tot} , Bisogna garantire che il pendolo rientri nello spazio di lavoro designato per quello scafo.

I primi due punti impongono delle limitazioni da un punto di vista inerziale, e dunque sui due parametri, $m_p l$ e I_{yy_c} . Il terzo e quarto punto impongono una limitazione sul braccio e sul raggio del pendolo rispetto alla cerniera, che è fissata a 1.2 metri dal CoG.

13.1.1. Geometria del pendolo: cilindrico semi-riempito

Come prima geometria alternativa è stato considerato un cilindro cavo di spessore fisso s , riempito fino ad una certa percentuale. Dunque, i parametri di progetto che influenzano le caratteristiche inerziali sono:

1. L , distanza dalla cerniera al centro di massa del pendolo
2. R , raggio interno del pendolo
3. Cr , coefficiente di riempimento definito come $Cr = d/R \in [0,2]$ dove con 0 si ottiene un cilindro cavo di raggio interno R ed esterno $R+s$ mentre con 2 si ottiene un cilindro pieno con raggio esterno $R+s$.
4. h , larghezza del pendolo.

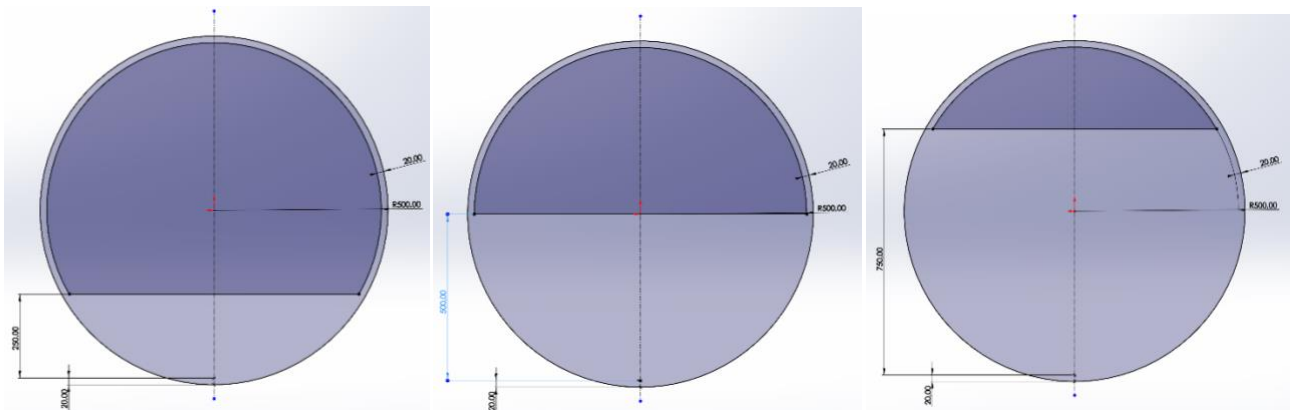


Figura 51 Sezione di un pendolo a Raggio fissato con Cr rispettivamente 0.5, 1 e 1.5

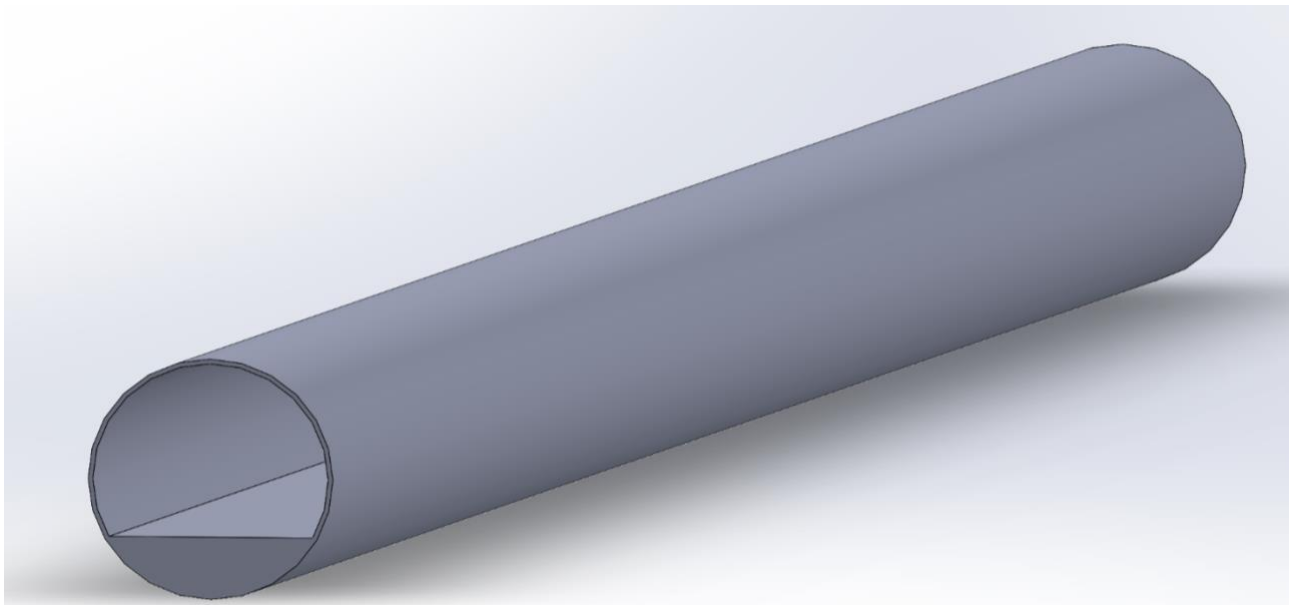


Figura 52 Pendolo estruso con Cr 0.5.

Dato che i parametri in gioco sono quattro e che la relazione analitica per il calcolo dei momenti di inerzia è molto complessa (a meno che per h), non è stato possibile mettere direttamente in relazione I_{yy_c} e $m_p l$ con i parametri geometrici. Dunque, è stato fissato h come massimo e si sono generate N*M geometrie facendo variare Cr e R. Di queste geometrie è stato calcolato il braccio che riportasse il rapporto $I_{yy_c}/m_p l$ a quello desiderato. Successivamente sono state eliminate tutte le geometrie con un valore di $m_p l$ (o I_{yy_c} , è ininfluente dato che il rapporto è garantito) inferiore a quello voluto. Tutte le restanti geometrie sono state scalate lungo h per riportare i parametri voluti di ML e I_{yy_c} . Successivamente sono state eliminate tutte le geometrie non valide, ovvero quelle con un ingombro maggiore dello spazio di lavoro. Nella figura sottostante sono riportate le geometrie valide.

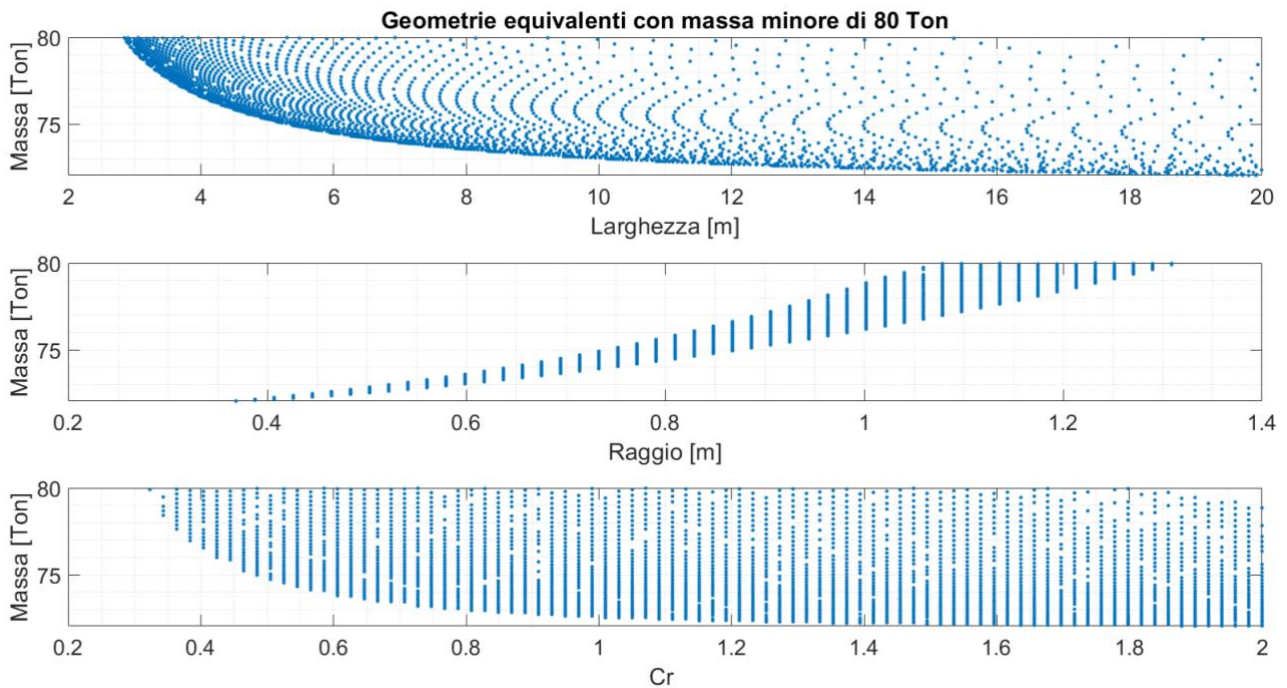


Figura 53 influenza della Larghezza, del Raggio e del Cr sulla massa del pendolo. L'ingombro considerato è una circonferenza di raggio 3.2m

È possibile notare che per una diminuzione della larghezza del pendolo la massa dello stesso aumenta. Inoltre, la configurazione ottimale risulta essere quella per un cilindro pieno di larghezza massima e raggio minimo. Tuttavia, ci sono geometrie alternative che hanno una variazione della massa contenuta ma portano con sé una facilità aggiuntiva in fase di realizzazione e dunque da considerare valide per un'analisi dei costi e di fattibilità del pendolo stesso.

13.1.2. Geometria del pendolo: Parallelepipedo

Come ulteriore configurazione è stata analizzata una geometria semplice a forma di parallelepipedo. I parametri che definiscono la geometria sono:

- a, lato lungo della sezione rettangolare.
- b, lato corto della sezione rettangolare.
- L, distanza dalla cerniera al centro di massa del pendolo
- h, larghezza del pendolo

A differenza del caso esaminato precedentemente è possibile avere una formulazione analitica semplice per il momento di inerzia baricentrico lungo l'asse y.

$$I_{yy} = \frac{1}{12} abh\rho(a^2 + b^2) = \frac{1}{12} m(a^2 + b^2)$$

Il procedimento per la valutazione delle geometrie alternative nel caso del parallelepipedo è analogo a quello fatto per il caso del cilindro semi pieno. I risultati ottenuti sono però molto differenti. Ci sono molte più geometrie disponibili che

garantiscono l'equivalenza dinamica, ma la massa inizia ad aumentare vertiginosamente all'allungarsi del lato

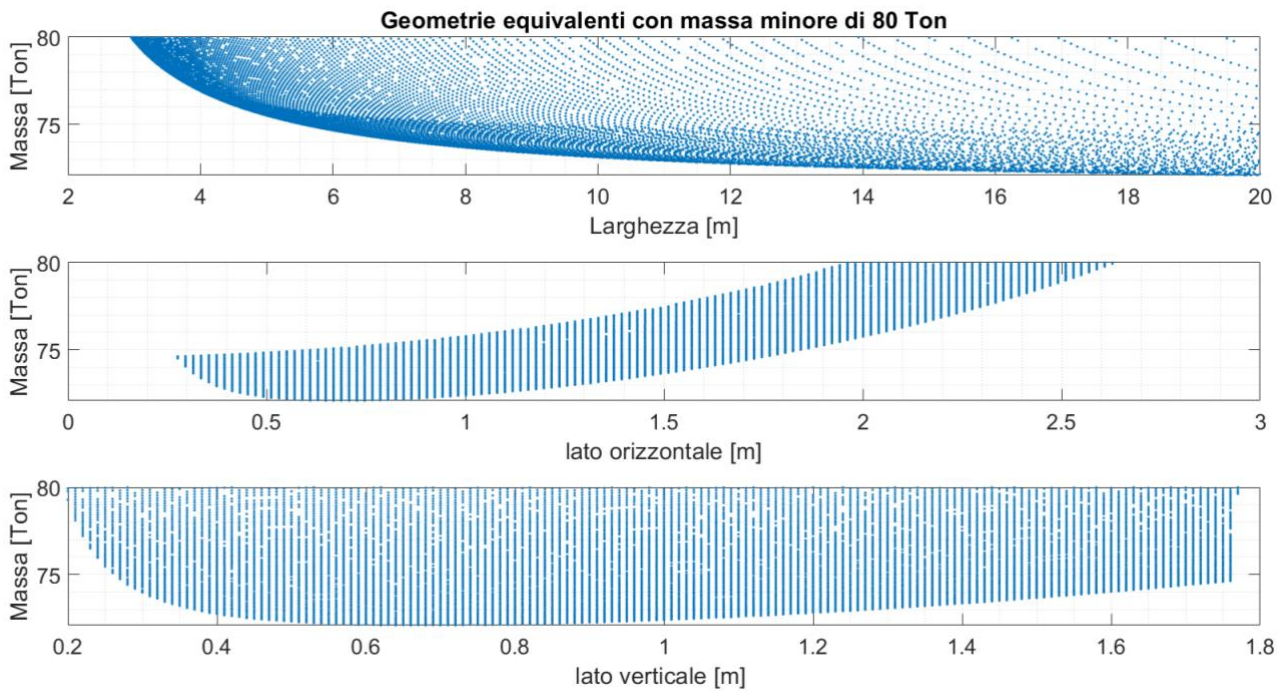


Figura 54 sotto i 7 metri di larghezza la massa del pendolo inizia a crescere notevolmente, così come sopra una lunghezza del lato orizzontale di 1.5 metri.

orizzontale. Il lato verticale è limitato principalmente dal limite sull'ingombro. Inoltre, si può notare come la situazione ottimale si ottiene quando i due lati hanno una dimensione pari circa al doppio del raggio che si ottiene nel caso del pendolo cilindrico di massa minore, dimostrando che la configurazione che minimizza la massa è una geometria che si avvicina a un cilindro pieno.

Queste geometrie non sono da scartare, perché più facili da realizzare e quindi potenzialmente più economiche.

13.2. Confronto delle geometrie per una larghezza fissata

Si riporta una tabella delle geometrie possibili per quanto riguarda una larghezza del pendolo fissata. Fra tutte le possibili geometrie a larghezza fissata, verrà considerata quella con una massa minore. Inoltre, si analizzerà l'uso della ghisa (7.8 kg/dm³) e del cemento (2.4 kg/dm³) come materiale per la produzione del pendolo. Com'è possibile notare le soluzioni in cemento hanno una massa più grande, differenza che per larghezze minori del pendolo si accentua. Per quanto riguarda le differenze fra il pendolo cilindrico e a forma di parallelepipedo le differenze sono impercettibili; quindi, si può affermare che la scelta della geometria dovrebbe essere influenzata esclusivamente valutando la facilità di realizzazione del pendolo.

Tipo	Materiale	Larghezza [m]	Massa [Ton]	Lato orizzontale [m]	Lato verticale [m]	Cr	Raggio [m]	Braccio [m]
Cilindrico	ghisa	20.0	72.0			1.8	0.37	2.40
Cilindrico	ghisa	19.9	72.0			2.0	0.37	2.40
Cilindrico	cemento	20.0	74.4			1.8	0.71	2.32
Cilindrico	cemento	18.8	74.6			2.0	0.71	2.31

Parallelepipedo	ghisa	20.0	72.1	0.75	0.62			2.40
Parallelepipedo	cemento	20.0	74.6	1.30	1.20			2.32
Cilindrico	ghisa	14.6	72.4			2.0	0.43	2.39
Cilindrico	cemento	15.0	75.7			1.8	0.82	2.28
Parallelepipedo	ghisa	15.0	72.4	0.81	0.77			2.39
Parallelepipedo	cemento	15.0	76.0	1.43	1.48			2.27
Cilindrico	ghisa	10.0	73.0			1.8	0.54	2.37
Cilindrico	cemento	9.9	78.9			2.0	1.01	2.19
Parallelepipedo	ghisa	10.0	73.1	1.00	0.94			2.36
Parallelepipedo	cemento	10.0	79.4	1.82	1.82			2.18
Cilindrico	ghisa	7.4	73.8			1.9	0.62	2.34
Cilindrico	cemento	7.5	83.3			1.9	1.20	2.07
Parallelepipedo	ghisa	7.5	73.9	1.14	1.11			2.34
Parallelepipedo	cemento	7.5	84.7	2.35	2.00			2.04

14. Possibili configurazioni interne per PEWEC

Per l'analisi seguente si fa riferimento alla tabella presente nella sezione precedente che descrive le geometrie alternative per il pendolo. L'obiettivo dell'analisi è valutare quale configurazione risulta essere ottimale in termini di costi, manutenzione e/o sostituzione dell'unità pendolo.

Per il pendolo in ghisa non è considerata una struttura interna al pendolo in quanto il materiale è resistente a trazione mentre per la soluzione in cemento è necessaria una gabbia in acciaio per evitare cedimenti strutturali del pendolo stesso. Si valuterà in futuro la possibilità di realizzare il pendolo in calcestruzzo armato senza presenza della gabbia in modo da ridurre ulteriormente i costi. Inoltre, è stato considerato il peso della struttura esterna necessaria a installare il pendolo. In questa fase preliminare il peso della struttura esterna è stato considerato essere il 30% del peso del pendolo. Per le fasi successive di design sarà necessario uno studio più accurato sui carichi per dimensionare con più accuratezza la struttura necessaria a sorreggere il pendolo. Infatti, all'aumentare della larghezza del pendolo il peso della struttura esterna aumenta in quanto il momento flettente generato dal pendolo è maggiore.

Inoltre, bisogna considerare che lo scafo ha una larghezza di 22.5m totali. Sarà necessario considerare lo spessore dello scafo esterno e lo spazio per mantenere componenti meccaniche e elettriche del sistema. Per le considerazioni fatte la soluzione con il pendolo largo 20m non è praticabile. Per questo motivo vengono considerate alcune soluzioni alternative per descrivere un layout preliminare che si possa effettivamente realizzare. Sono proposte di seguito alcune configurazioni, valutando la differenza di costo di realizzazione e parlando in modo qualitativo dei vantaggi e svantaggi di una configurazione con doppio pendolo.

Nella seguente analisi sarà considerata il costo per l'unità pendolare per le componenti meccaniche e per la manodopera, non considerando la parte elettrica in quanto questa parte rimane inalterata al variare della geometria del pendolo.

14.1. Pendolo in Ghisa

Per l'analisi seguente si considera un pendolo a forma di parallelepipedo. Infatti, questa soluzione è la più facile in termini di realizzazione e comporta un aumento di peso minimo rispetto alla soluzione con un pendolo cilindrico. Per la realizzazione del pendolo è stato considerato il costo riportato in Tabella 10 presente nel paragrafo 4.2, che consiste in 3 €/Kg_{unità}. Il costo della struttura esterna SE prende in considerazione tutti gli elementi meccanici restanti e i costi per la manodopera: albero, cuscinetti, montaggio, equilibratura testing, verniciatura e collaudo per un ammontare di 3.5 €/Kg_{unità}.



Figura 55 Variazione del costo del pendolo in funzione della larghezza.

Tabella 16 Configurazioni possibili del pendolo al variare della larghezza. SE Struttura Esterna.

Larghezza [m]	Peso Pendolo [Ton]	Peso SE [Ton]	Peso totale [Ton]	Costo Pendolo [K€]	Costo SE [K€]	Costo Totale [K€]	Costo rispetto alla soluzione ottima
20	72.1	22	94	281	328	609	100.0%
15	72.4	22	94	282	329	612	100.4%
10	73.1	22	95	285	333	618	101.4%
7.5	73.9	22	96	288	336	624	102.5%

È possibile notare che la variazione in termini di costi risulta essere estremamente contenuta. Dunque, risulta essere più conveniente la soluzione con il pendolo largo 7.5m in quanto minimizza il momento flettente sul pendolo, favorisce una maggior facilità di installazione e di manutenzione.

14.2. Pendolo in Cemento

Per il pendolo in cemento, come detto in precedenza, è necessario costruire una struttura in acciaio che sostenga i carichi del pendolo stesso. In prima analisi si consideri che il peso dell'acciaio costituisca il fra il 5-10% della massa del pendolo. Per avere una stima più accurata della percentuale in peso dell'acciaio va condotto un'analisi FEM considerando l'accelerazione massima subita dal pendolo accoppiata con le condizioni estreme considerate per dimensionare lo scafo. Per avere un ordine di grandezza dei costi in confronto al pendolo in ghisa è quindi stata fatta quest'ipotesi. Per il costo del cemento è stato considerato 0.25 €/kg [13] mentre per l'acciaio è stato considerato un costo di 7 €/kg, pesando opportunamente fra le componenti che richiedono una lavorazione di precisione (10€/kg) e acciaio di carpenteria (4€/kg) [13].

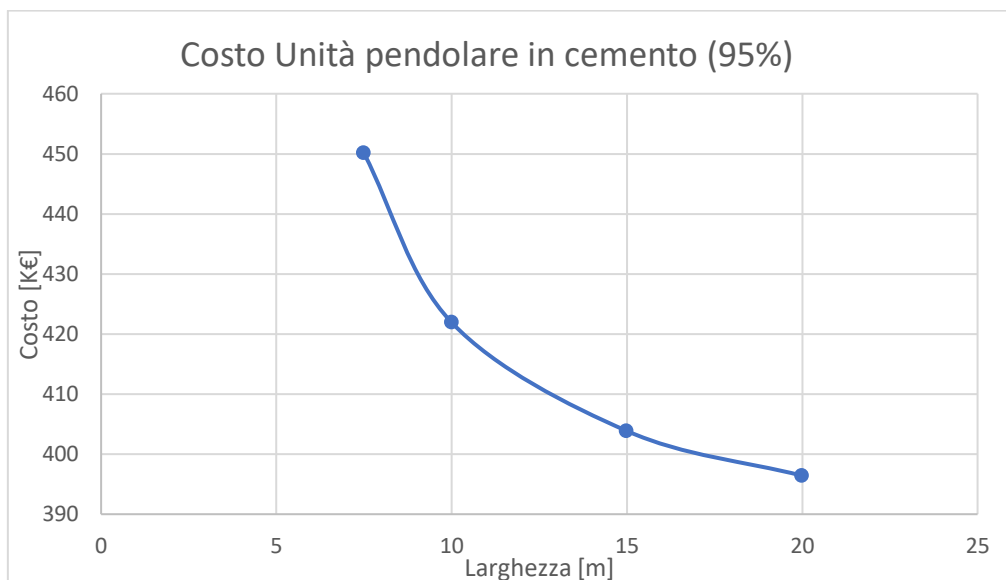


Figura 56 Variazione del costo del pendolo in funzione della larghezza

Tabella 17 Configurazioni possibili del pendolo al variare della larghezza

Larghezza [m]	Peso Pendolo [Ton]	Peso SE [Ton]	Peso totale [Ton]	Costo Pendolo [K€]	Costo SE [K€]	Costo Totale [K€]	Costo rispetto alla soluzione ottima
20	74.6	22	97	57	339	396	100%

15	76	23	99	58	346	404	102%
10	79.4	24	103	61	361	422	106%
7.5	84.7	25	110	65	385	450	114%

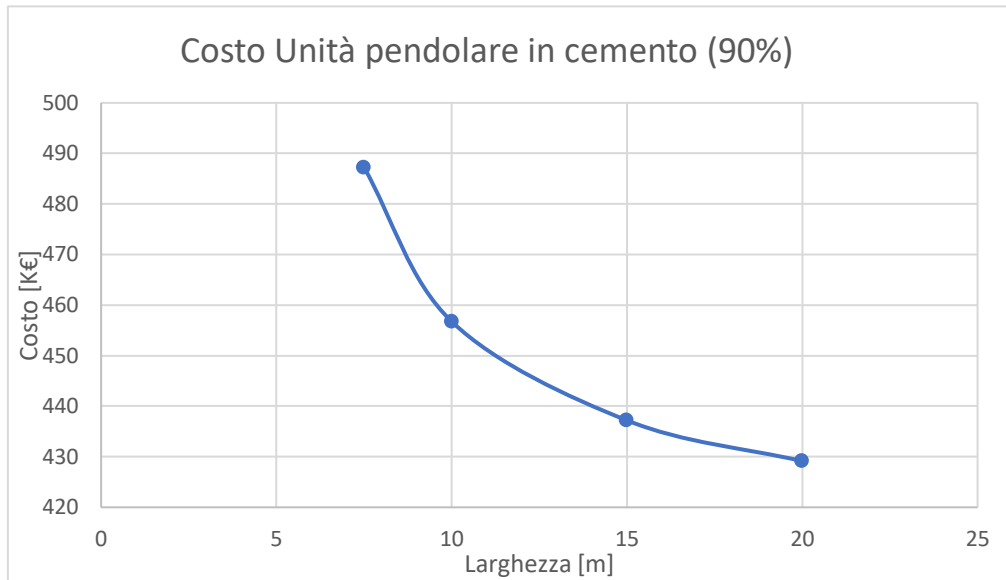


Figura 57 Variazione del costo del pendolo in funzione della larghezza

Tabella 18 Configurazioni possibili del pendolo al variare della larghezza

Larghezza [m]	Peso Pendolo [Ton]	Peso SE [Ton]	Peso totale [Ton]	Costo Pendolo [K€]	Costo SE [K€]	Costo Totale [K€]	Costo rispetto alla soluzione ottima
20	74.6	22	97	90	339	429	100%
15	76	23	99	91	346	437	102%
10	79.4	24	103	95	361	457	106%
7.5	84.7	25	110	102	385	487	114%

Per il pendolo in cemento la variazione del costo in funzione della larghezza è notevole. A differenza della soluzione in ghisa l'aumento del peso per il pendolo di larghezza 7.5m è del 14%. In questo caso la soluzione più conveniente sembra essere quella di un pendolo di larghezza 10m in quanto è un buon compromesso fra aumento dei costi, riduzione del momento flettente facilità di installazione e manutenzione.

14.3. Paragone fra le diverse soluzioni

Di seguito è riportato il grafico dei costi per le diverse soluzioni. È evidente che il costo del pendolo in cemento è notevolmente più basso in quanto il pendolo stesso rappresenta una buona percentuale del costo totale dell'unità, e il cemento ha un ordine di grandezza di differenza di costo per kg rispetto alla ghisa.

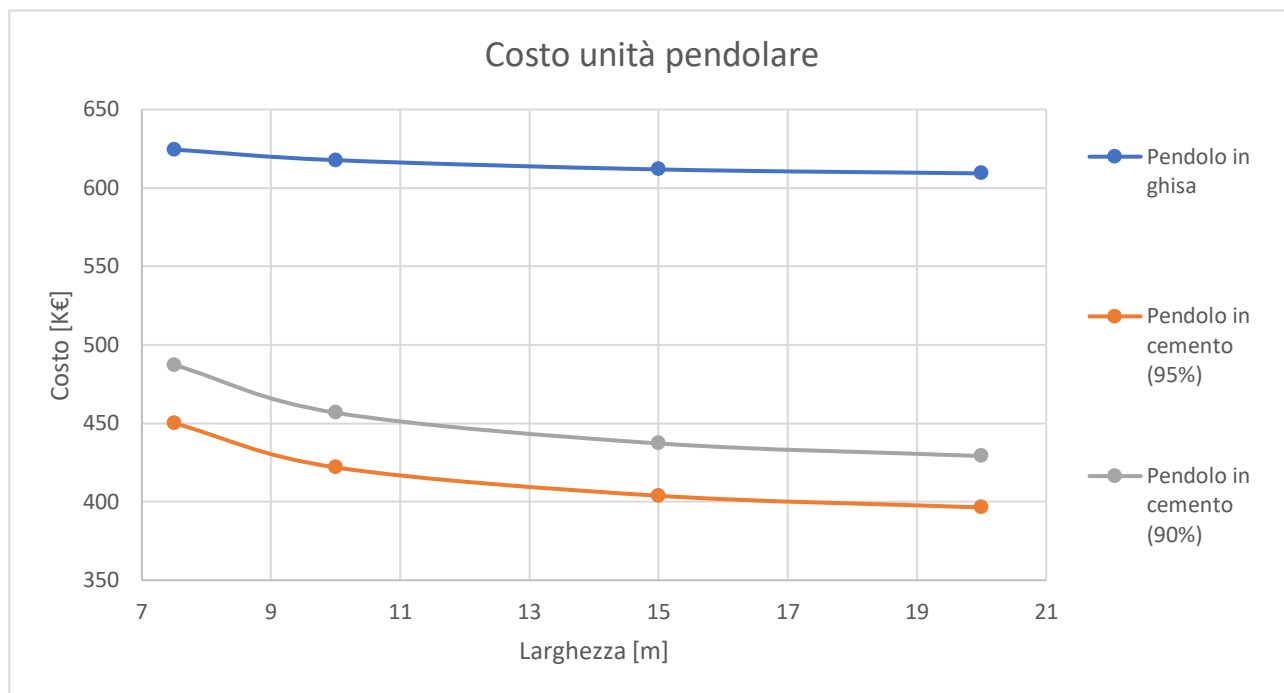


Figura 58 Confronto del costo del pendolo realizzato in diverse configurazioni

14.4. Configurazione PTO

Per ridurre ulteriormente il momento flettente prodotto dal pendolo, è possibile dividere l'unità pendolare in due distinti pendoli. I vantaggi di questo approccio sono molteplici:

- Il costo di realizzazione del pendolo può essere ulteriormente ridotto in funzione di una produzione parallela del pendolo stesso.
- I costi di installazione sono ridotti in quanto è più facile trasportare e installare un pendolo con peso minore.
- In caso di guasto può essere sostituito solo uno dei due pendoli, riducendo così i costi di manutenzione.
- Nel caso di separare completamente le due unità, si può pensare di installare due PTO per ridurre ulteriormente i costi di manutenzione ed evitare che la macchina, in caso di guasto, non generi potenza.

Per quanto riguarda i costi di due PTO da 261 KW rispetto a un singolo di 523 KW si stima un aumento del 12%, che distribuito sul costo di tutta l'unità di conversione e del sistema di trasmissione si riduce a un incremento stimato minore del 4.5%. In funzione delle considerazioni fatte un aumento dei costi così contenuto è accettabile in cambio della versatilità che acquisisce il sistema. Di seguito è riportata la tabella considerando i costi di un pendolo in cemento con 10% in acciaio comprensivi di PTO e sistema di trasmissione di potenza. Considerando la dinamica del pendolo, le velocità massime angolari raggiunte dal dispositivo sono circa 1.5 rad/s. Considerando che la velocità massima di rotazione dei motori considerati per l'analisi è 36.5 rad/s, il rapporto di trasmissione consigliato è 1:25-1:30. Per quanto riguarda il riduttore esistono soluzioni commerciali che possono essere impiegate per questa applicazione particolare come mostrato in Figura 59. Questi riduttori permettono il montaggio fino a 3 generatori sullo stesso riduttore diminuendo così le perdite per attrito dovute ad un eventuale soluzione parallela. Tramite apposita flangia e supporto il gruppo riduttore e generatore può essere collegato direttamente all'albero che sostiene il pendolo.

Servox® DS
Torque range from 25 kNm to 2.000 kNm and more
Gear ratios 4 - 48

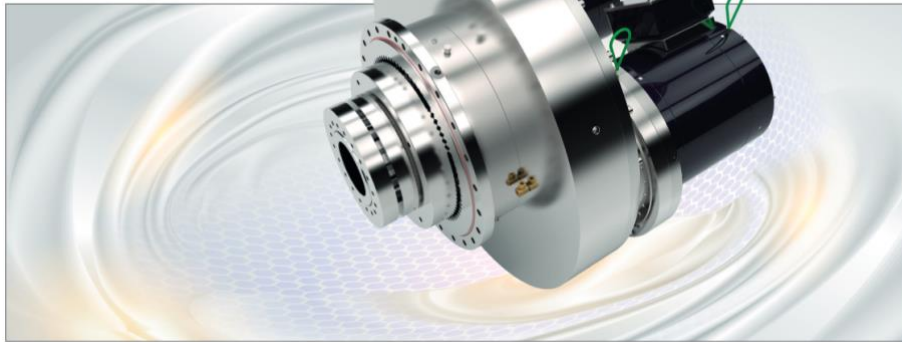


Figura 59 Riduttore epicicloidale Servox DS della Desch.

Per quanto riguarda il generatore elettrico si fa riferimento al lavoro di tesi svolto da Pozzi [43] che aveva individuate come soluzione ottimale per questa tecnologia i generatori a magneti permanenti. Nella tesi propone come esempio di soluzione commerciale I motori Siemens della serie 1FW3. I parametri del PTO elettrico da dover rispettare sono presenti in Tabella 5:

- Velocità nominale 250 rpm
- Coppia nominale 20000 Nm
- Potenza nominale 523 kW

Dal catalogo Siemens il motore con codice 1FW3287-2FG73 e mostrato in Figura 60 soddisfa questi requisiti qualora ne vengano montati 3 in parallelo. I valori nominali del singolo motore sono: velocità nominale 250 rpm, coppia nominale 6900 Nm, Potenza nominale 181 kW. Considerando i 3 generatori montati in parallelo si raggiungono i seguenti valori:

- Velocità nominale (3 generatori): 250 rpm
- Coppia nominale (3 generatori): 20700 Nm
- Potenza nominale (3 generatori): 543 kW

Questi valori si avvicinano a quelli desiderati ottimali e può essere considerata in prima battuta una soluzione tecnica interessante per questa applicazione.

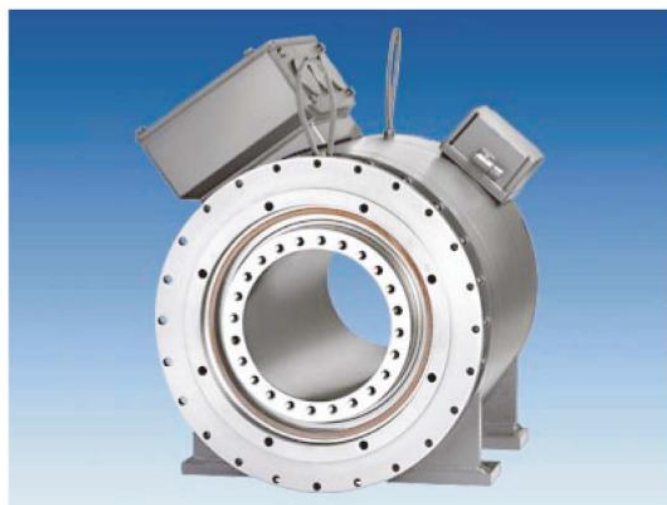
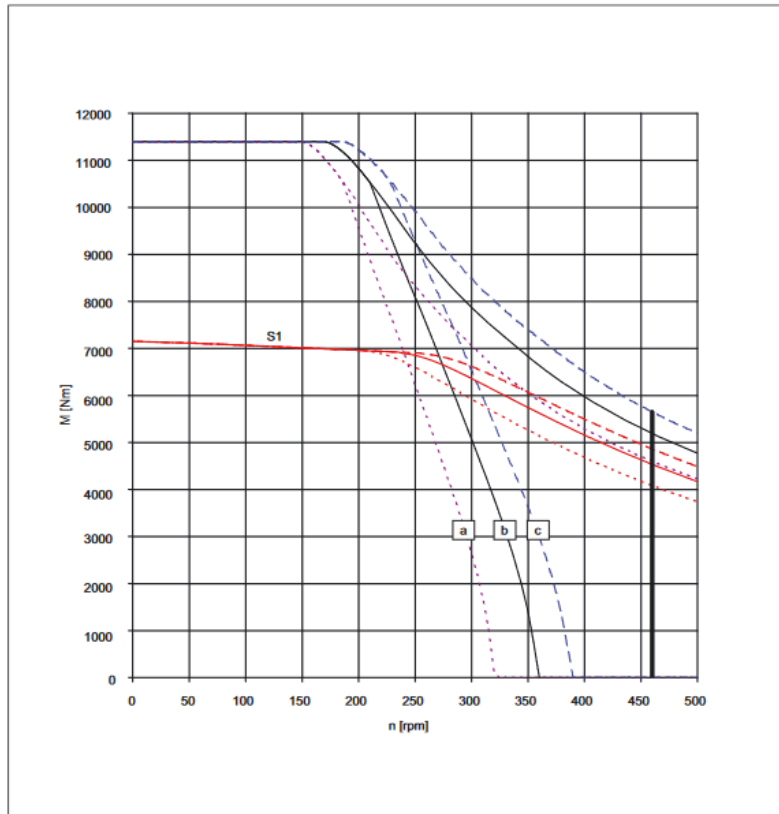


Figura 60 Motore torque Siemens 1FW3 completo.



[a] SINAMICS S120 Smart Line Module / Basic Line Module / Power Module, $U_{\text{rate eff}} = 400 \text{ V}$
 [b] SINAMICS S120 Active Line Module, $U_{\text{rate eff}} = 400 \text{ V}$
 [c] SINAMICS S120 Smart Line Module / Basic Line Module / Power Module, $U_{\text{rate eff}} = 480 \text{ V}$
 Le curve caratteristiche sono valide solo per i dati di impostazione del convertitore ottimizzati

Figura 61 caratteristica coppia-velocità del motore Siemens 1FW3287.

Tabella 4- 44 1FW3287, numero di giri nominale 250 1/min

Dati di progettazione	Abbreviazion e	Unità	1FW3287-2DG
N. di giri nominale	n_N	1/min	250
Numero di poli	$2p$		20
Coppia nominale	$M_N (100 \text{ K})$	Nm	6900
Potenza nominale	$P_N (100 \text{ K})$	kW	181
Corrente nominale	$I_N (100 \text{ K})$	A	352
Coppia da fermo	$M_0 (100 \text{ K})$	Nm	7150
Corrente da fermo	$I_0 (100 \text{ K})$	A	365
Momento d'inerzia	J_{mot}	kgm ²	7,81
Trasmissione misura numero di giri (in caso di montaggio encoder tramite cinghia)	i_{enc}	--	-5
Dati limite			
Numero di giri max. ammesso (mecc.)	$n_{\text{max mecc}}$	1/min	1000
Numero di giri max. ammesso senza VPM	$n_{\text{max 530 V}}$	1/min	460
Coppia massima	M_{max}	Nm	11400
Corrente massima	I_{max}	A	632
Costanti fisiche			
Costante di coppia	k_T	Nm/A	19,6
Costante di tensione (concatenata)	k_E	V/1000 1/min	1256
Resistenza avvolgimento a 20 °C	R_{base}	Ω	0,0281
Induttanza del campo rotante	L_D	mH	1,44
Costante di tempo elettrica	T_{el}	ms	37
Costante di tempo meccanica	T_{mecc}	ms	2,4
Costante di tempo termica	T_{th}	min	16
Resistenza torsionale dell'albero	C_t	Nm/rad	65800000
Peso	m	kg	1030

I dati nominali indicati sono validi per $U_{\text{rate eff}} = 400 \text{ V}$, Active Line Module, curva caratteristica [b].

Figura 62 Datasheet tecnico del motore elettrico Siemens 1FW3287.

14.5. Configurazione elettrica interna PeWEC e connessione alla rete

In un futuro dimensionamento dell'impianto pilota bisognerà considerare il sistema di trasmissione della potenza dal generatore elettrico al cavo di rete. I componenti principali di trasformazione di energia e trasmissione della potenza può essere riassunto nei seguenti elementi:

- Motore elettrico: costituito dai generatori elettrici a magneti permanenti accoppiati all'albero del pendolo tramite un sistema di riduttori meccanici epicicloidali
- Driver motore elettrico
- Batterie al litio e super-capacitori: per lo storage interno di energia elettrica e filtro delle forti oscillazioni di potenza elettrica
- DC BUS: è un canale di potenza bipolare a corrente continua, che permette la connessione e alimentazione degli elementi del sistema elettrico del PeWEC
- DC/AC AFE (Active Front End) inverter: componente che garantisce la qualità di energia elettrica prodotta dal dispositivo (abbattendo le armoniche dei flussi di corrente elettrica) per renderla compatibile con i requisiti della rete
- Trasformatore: per innalzare la tensione in uscita dal dispositivo

Per quanto concerne la potenza di targa del dispositivo, la taglia può essere ricavata dalla Figura 19 ed in funzione del range ottimale scelto in precedenza il suo valore si aggira tra i 40 e 60 kW di potenza assicurando così un giusto compromesso tra valori di capacity factor e di energia estraibile dal dispositivo per il dato sito. La taglia di potenza del dispositivo e quindi il suo capacity factor, sono elementi che influenzano il dimensionamento della connessione elettrica a terra e il relativo costo.

In Figura 63 è riassunto lo schema del sistema elettrico interno. Il DC BUS è l'elemento legante tra il sistema di generazione di potenza e il resto del sistema elettrico interno. Con il DC BUS sono connessi il pacco batterie e super capacitori e il canale in uscita dell'AFE inverter collegato poi al trasformatore. L'innalzamento di tensione è necessario al fine di ridurre i valori delle perdite di potenza nella fase di trasmissione nei cavi che collegano il dispositivo al punto di allaccio con il TSO (transmission system operator).

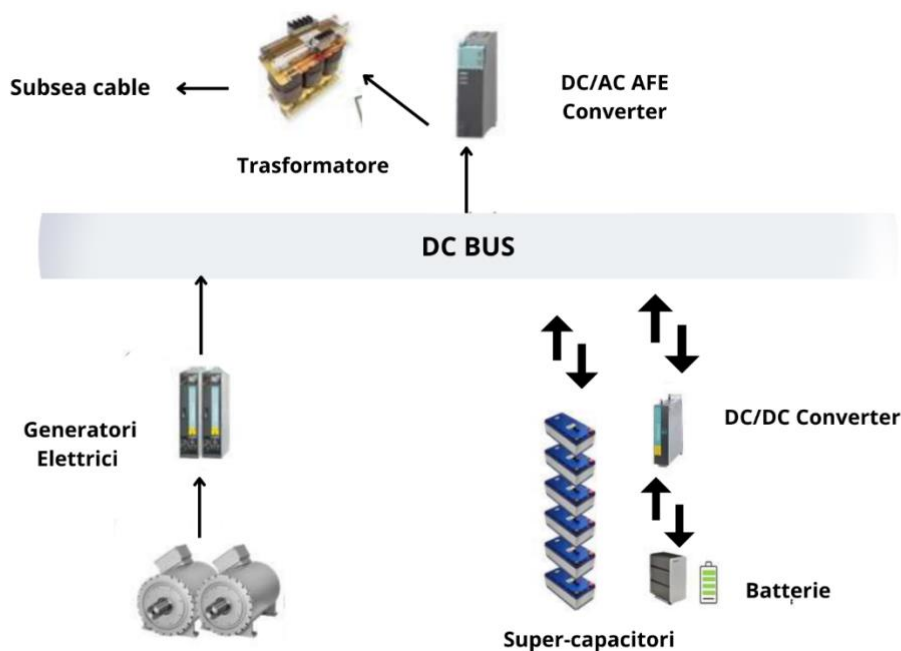


Figura 63 Configurazione elettrica PeWEC

Dato che la potenza prodotta sarà molto variabile nel tempo, è possibile che alcune componenti elettriche possano risentire delle grandi variazioni di potenza in output che caratterizzano il sistema. Si suggerisce quindi di integrare un Power delivery system costituito da un pacco batteria-super capacitori gestito da un BMS (Battery Management System). Tramite l'inserimento di questo componente è possibile gestire le tensioni e le correnti in output, facendo lavorare il pacco batterie in uno spazio di lavoro sicuro sia per tensioni che per correnti. Questo sistema prolunga la vita operativa delle batterie monitorandole e assicurandosi che non vengano superate le temperature critiche che comporterebbero a un deterioramento eccessivo delle stesse. Tramite questi componenti è possibile fornire alla linea in output una potenza media più regolare, evitando picchi che potrebbero portare a un sovraccarico della linea, soprattutto in previsione di una farm in cui più dispositivi sono collegati allo stesso cavo per il trasporto di energia elettrica onshore. In questo modo è possibile dimensionare il cavo per la trasmissione di energia elettrica onshore sulla potenza media erogata e non sul picco di potenza.

La configurazione del sistema elettrico proposta (trasmissione in AC adatta all'immissione in rete) è ottimale quando si usa un numero limitato di dispositivi [44]. Man mano che il numero di dispositivi aumenta il costo delle infrastrutture del sistema elettrico può essere ottimizzato considerando una configurazione differente. Ad esempio, si possono esternalizzare alcuni elementi fuori dal dispositivo quali il trasformatore e l'AFE inverter. Questi possono essere collocati (come mostra la Figura 64) all'interno di un HUB sottomarino o galleggiante che accoglie in entrata i cavi dinamici dei dispositivi in modo radiale e in uscita avrà un unico cavo abbattendo così i costi associati network elettrico.

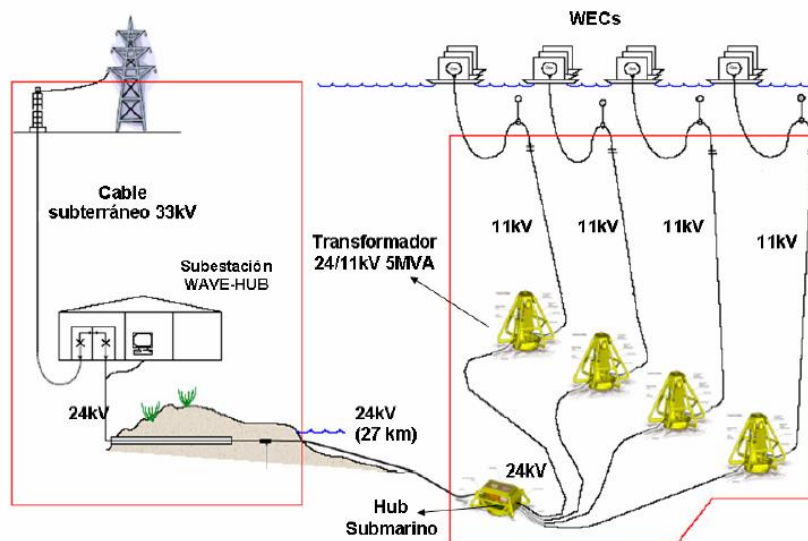


Figura 64 Network elettrico del PeWEC in caso di array.

Il sistema elettrico in uscita dal dispositivo PeWEC sarà invece composto dai seguenti elementi adatti per un impianto pilota e non per una farm numerosa di dispositivi:

- Umbilical cable/dynamic cable: la sezione di cavo che connette il punto di uscita dal dispositivo fino al punto di giunzione con il connettore che lo lega alla sezione di cavo di trasmissione di potenza.
- Bending resistor: è un elemento di sicurezza che si colloca all'interfaccia tra l'umbilical cable e dispositivo, esso garantisce la tenuta del cavo e lo smorzamento delle sollecitazioni a fatica generate dal movimento relativo dei componenti galleggianti.
- Connettore: rappresenta l'elemento del sistema che connette l'umbilical cable con l'allaccio ai cavi fissi di trasmissione di potenza. Possono essere dry-mate o wate-mate [45] in funzione della configurazione del punto di connessione se rispettivamente sott'acqua o su di una piattaforma galleggiante.
- Lina di trasmissione: è l'infrastruttura fissa del sistema della rete elettrica del dispositivo che connette dal punto dei connettori fino al punto di consegna al TSO. Generalmente esso può essere posato sul fondale e poi ricoperto con diverse tipologie di coperture [46] o interrato sotto il fondale.

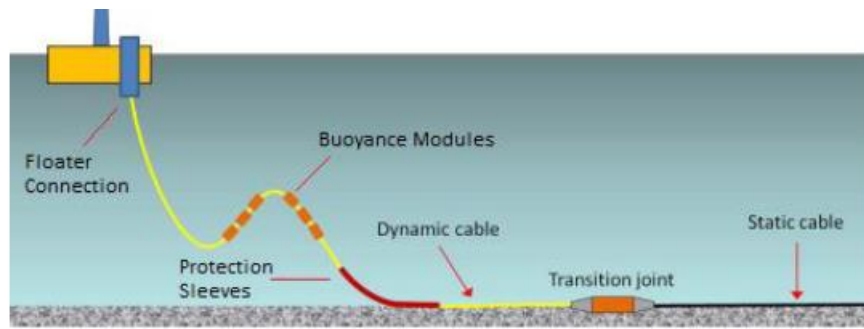


Figura 65 Layout di connessione elettrica del PeWEC.

14.6. Individuazione di attori industriali

In questo paragrafo vengono riportati due esempi di attori industriali presenti e operanti sul territorio italiano per la costruzione del prototipo in scala al vero di PeWEC. La prima società è la Rosetti Marino SPA esperta nel settore della progettazione e costruzione di strutture offshore con applicazioni principalmente nel campo dell'oil&gas ed esperti nella cantieristica navale. Per quanto riguarda invece il settore rinnovabili questa società possiede know-how in ambito eolico nearshore. La loro sede operativa e cantieristica si trova presso il porto industriale di Ravenna. Altra società di interesse per la realizzazione e assemblaggio dell'unità pendolare, configurazione quadri elettrici e testing in officina è la ARIS SPA presente nel territorio piemontese nei pressi di Torino. Punto di forza della società è l'aver già lavorato in ambito wave energy collaborando al progetto ISWEC in collaborazione con il Politecnico di Torino possedendo quindi il dovuto know-how per lo sviluppo di questa tecnologia innovativa.

15. Sviluppi futuri

La tecnologia del PeWEC fa riferimento allo stato dell'arte nella realizzazione di impianti offshore, ma nuove soluzioni innovative possono essere investigate, per future integrazioni con la tecnologia a cui si è giunti in ottica di riduzione costi e aumento delle prestazioni di conversione del sistema. Inoltre, La progettazione preliminare del sistema PeWEC rende possibile una migliore parametrizzazione dei vari sottosistemi e la valutazione dei relativi costi; questo comporta la possibilità di individuare scafi ottimali dal punto di vista tecno-economico rispetto alla soluzione attuale. In quest'ottica, si propongono alcune soluzioni che potrebbero portare, dovessero dare i risultati desiderati, ad ulteriore incremento della produttività del dispositivo o ad una riduzione del costo del dispositivo. In tal senso, vengono presentate diverse opportunità potenzialmente promettenti e per questo degne di ulteriori attenzioni nel prossimo futuro: scafo in calcestruzzo, pannelli solari sullo scafo, sistemi di ormeggi innovativi e, infine, l'adozione di PTO idraulici, controllo predittivo (MPC control).

15.1. Scafo in calcestruzzo

Tra i principali punti per la riduzione di costo di produzione e manutenzione del dispositivo, l'utilizzo del calcestruzzo è uno dei più importanti.

L'uso del calcestruzzo armato in ambiente marino non è certamente una novità e viene principalmente utilizzato per la costruzione di piattaforme e strutture galleggianti. Lo scoglio principale che ha escluso il calcestruzzo dall'essere un materiale adatto a navi ed oggetti flottanti è legato al peso dello stesso, che comparato all'acciaio o anche alla vetroresina (per gli scafi più piccoli), rende limitante la capacità di carico del flottante. Nel caso di PeWEC in quanto sono già previste delle zavorre aggiuntive per appesantire lo scafo questo problema non sussiste. Secondo degli studi recenti [34] l'utilizzo del calcestruzzo porterebbe ad una riduzione del costo del solo scafo fino al 42%.

15.2. Pannelli solari sullo scafo

Sinergie con fonti rinnovabili da solare sono possibili con il dispositivo PeWEC. Il dispositivo, infatti, presenta un'ampia area di coperta che può essere utilizzata per l'installazione di pannelli solari. I pannelli solari in mare sono un'opzione che negli anni è stata valutata sia per integrazioni su scafi che per la realizzazione di impianti off-shore. Su quest'ultimo punto, in particolare, negli ultimi tempi si stanno ipotizzando varie soluzioni. Stimando la risorsa solare presente sull'isola di Pantelleria, e considerando le dimensioni dello scafo full-scale, si considera che l'energia annua prodotta sarebbe dell'ordine delle 25 MWh.

15.3. Sistemi di ormeggio innovativi

Un altro importante aspetto che riguardi la riduzione di costo del dispositivo concerne l'uso di sistemi di ormeggio innovativi.

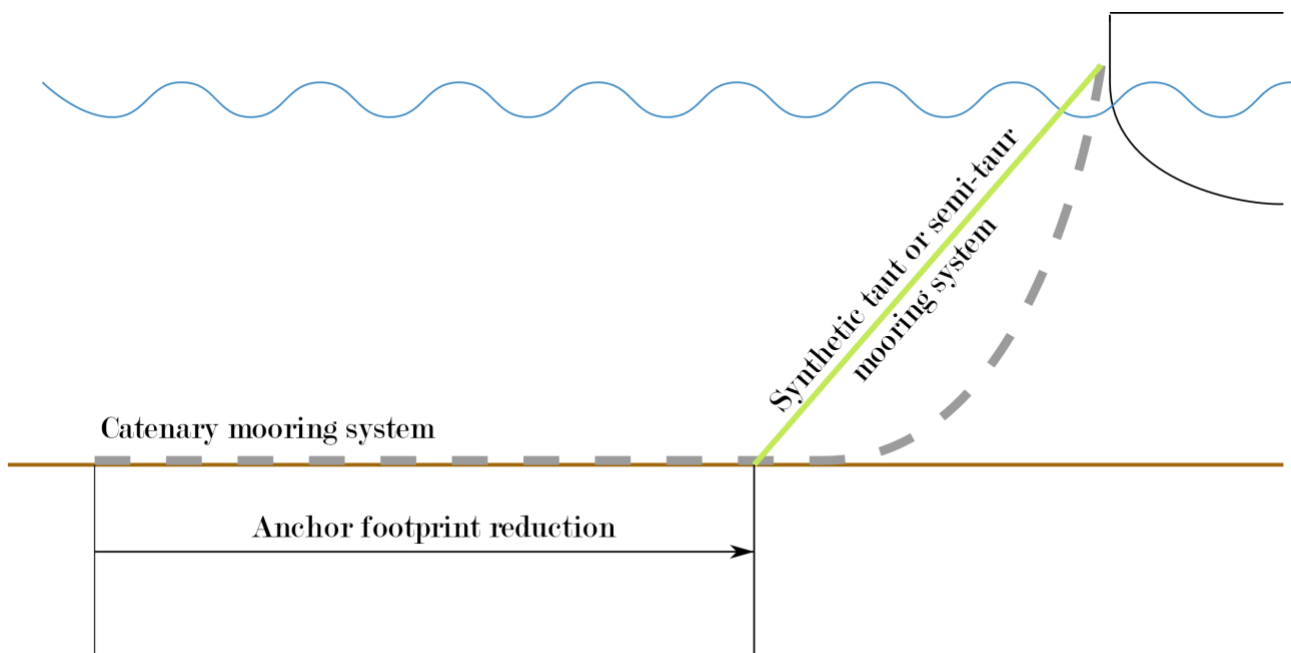


Figura 66 - Sistemi di ormeggio innovativi. Schema.

Il classico ormeggio a catenaria (del tipo mostrato in questo documento) può presentare una serie di svantaggi:

- La riduzione del carico all'ancora può richiedere un incremento del raggio di ancoraggio o di aumento di massa della catena. In ambo i casi si arriva ad un incremento di costo.
- L'aumento del raggio di ancoraggio comporta un aumento dell'impatto dell'ormeggio sul fondale che, potrebbe causare danni alla flora marina.

Come si evince da Figura 66, l'uso invece di un sistema di ormeggio basato su linee in materiale sintetico può portare sia ad una drastica riduzione del costo, in quanto la lunghezza della linea può ridursi enormemente, sia ad annullare l'impatto delle linee sul fondale, tramite l'utilizzo di ancore che supportano carichi verticali in quanto si va a sfruttare l'elasticità della linea e non il proprio peso. Facendo riferimento alle funzioni di costo delle catenarie in acciaio e materiale sintetico si può stimare una riduzione dell'ordine del 30% del costo dell'ormeggio adottando questa soluzione tecnologica.

15.4. PTO idraulico

Uno dei problemi più rilevanti delle tecnologie per la conversione dell'energia dal mare è l'elevata irregolarità del moto ondoso e la sua natura oscillatoria che si trasmette quindi nel profilo di potenza elettrica prodotta dal generatore. Il profilo di potenza dei generatori collegati direttamente o tramite riduttore al sistema di conversione meccanica di energia (in questo caso il pendolo) presenta un rapporto potenza di picco e potenza media elevato nell'ordine di un fattore 8-10. Per gestire questa grande variabilità e adattare la potenza elettrica prodotta per l'immissione in rete sono necessari componenti elettronici quali super-condensatori e inverter dimensionati per gestire questi profili di potenza con un aumento di costo notevole. Una soluzione a questa problematica, anche studiata in ambito eolico, è quella dell'adozione di sistemi di trasmissione idraulica fra la generazione di potenza meccanica (pendolo) e generatore elettrico.

I Power Take-Off (PTO) idraulici sono i sistemi di estrazione d'energia più diffusi in ambito offshore e possono essere utilizzate nei WEC per convertire il movimento oscillatorio, caratterizzato da moti a bassa velocità ed elevata forza o coppia, in energia elettrica [35]. Questa trasmissione è in grado di gestire i range di alta coppia e bassa velocità fornendo soluzioni in grado di sopportare grande densità di potenza con una tecnologia affidabile, standardizzata e scalabile [36].

Un esempio di trasmissione idraulica convenzionale per dispositivi per la conversione di energia da moto ondoso è riportato in Figura 67 dove un cilindro viene azionato dal moto del convertitore ed agisce come una pompa, producendo un flusso bidirezionale che aziona un motore idraulico che è rigidamente collegato a un generatore elettrico. Inoltre, un manifold (collettore) controllato e degli accumulatori, generalmente a pistone, sono utilizzati per migliorare la

controllabilità del sistema e smorzare il flusso irregolare generato dal cilindro idraulico. La trasmissione si adatta a entrambi i tipi di sistemi di conversione dell'energia delle onde, sia per sistemi traslazionali che rotazionali [37].

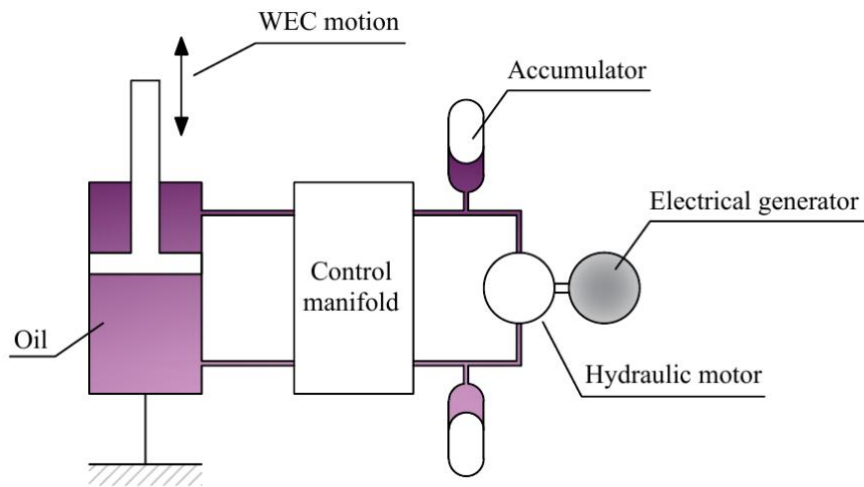


Figura 67 Esempio di un PTO idraulico per la conversione di energia da moto ondoso.

	Accumulator	LiON battery	Supercap module	KERS
				
Power density	20 kW/kg	0.5 kW/kg	2 kW/kg *	4 kW/kg
Energy density	3 Wh/kg	40 Wh/kg	1 Wh/kg *	4 Wh/kg
Round-trip eff.	94%	81%	92%	70-80%
Cost	<1€/kJ		approx. 20€/kJ	

*including internal wiring and cooling

Figura 68 Comparazione sistemi di accumulo di energia.

Le soluzioni idrauliche offrono, in generale, un più alto rapporto potenza/peso rispetto ad altre architetture di PTO, per esempio quelle meccaniche. Infatti, i componenti idraulici possono gestire grandi quantità di potenza e possono estrarre efficacemente l'energia dalla variazione continua del movimento del convertitore. Inoltre, grazie alla possibilità di installare diverse unità di accumulo, la potenza può essere filtrata con una soluzione molto più economica rispetto ai classici supercapacitori [38]. Si stima una riduzione del costo del PTO e della componentistica elettrica nell'ordine del 40-50% rispetto alla soluzione standard di connessione elettro-meccanica. Nonostante i vantaggi appena descritti, il PTO idraulico ha un'efficienza complessiva dichiarata che va dal 69% all'80% [39].

15.5. Controllo predittivo model based (MPC control)

L'altra strategia di controllo in fase di sviluppo è invece basata su una conoscenza pregressa del sistema fornita da un modello, ed è un controllo di tipo predittivo chiamato Model Predictive Control (MPC) [40]. Questa strategia di controllo è classificata come model-based perché essa utilizza un modello del sistema ad ogni passo temporale per propagare la dinamica del sistema stesso nel futuro, e ottimizzare le azioni da svolgere cercando di massimizzare (o minimizzare) una certa funzione di costo.

L'MPC calcola online, ad ogni passo, una successione di azioni ottimali da svolgersi a partire dall'istante attuale sino ad un orizzonte di tempo finito. Infatti, ad ogni passo, utilizzando le misure attuali di ingresso, uscita e stato del dispositivo, calcola, su un orizzonte temporale finito, una sequenza di azioni di controllo future in grado di minimizzare una funzione di costo, tenendo conto inoltre di eventuali vincoli costruttivi sull'azione di controllo (come la coppia erogata dal PTO)

o sugli stati del sistema (come velocità o posizione del pendolo nel caso di PeWEC). Dopodichè, non viene applicata l'intera sequenza di azioni appena ottimizzata, ma soltanto la prima, e l'intero processo viene ripetuto (seguendo il principio del *receding finite time horizon*).

In questa strategia di controllo, il modello adottato è una versione discretizzata del modello linearizzato dispositivo PeWEC, ottenuta in seguito ad un processo di *System Identification*, orientato a ottenere una rappresentazione significativa della dinamica del sistema tramite dei test mirati [41].

La forma finale del modello discretizzato è:

$$x(k + 1) = Ax(k) + B(u(k) + w(k))$$

Con A matrice rappresentante il contributo degli stati x , B il contributo degli input, dove u è il controllo e w è il disturbo generato dalle onde al PTO.

La funzione di costo ottimizzata ad ogni time step è [42]:

$$J = \sum_{k=1}^H x(k)^T u(k)^T + u(k)^T r u(k)^T + x(k)^T Q x(k)^T$$

Dove il primo termine mira a massimizzare la potenza estratta (un valore di potenza negativa corrisponde, per convenzione, a una potenza assorbita), il secondo termine (pesato tramite il peso r) penalizza eccessivi valori di coppia e il terzo termine penalizza valori eccessivi degli stati considerati (come la velocità al PTO).

Le potenzialità di questo tipo di controllore sono date dalle sue seguenti caratteristiche:

- Il controllore massimizza direttamente, istante per istante, la potenza assorbita, tenendo conto degli scenari futuri delle onde che andranno a eccitare il dispositivo PeWEC. Da una prima implementazione preliminare, la potenza assorbita risulta aumentare in un range +25-40% rispetto alla classica strategia PD.
- Lo sforzo sul dispositivo è contenuto poiché la coppia applicata al PTO dal controllore, nel processo di ottimizzazione che massimizza l'energia, tiene comunque conto dei vincoli strutturali che vengono imposti in termini di coppie, velocità ecc. Questo permette al controllo di ridurre drasticamente il rischio di fault o usure.
- Massimizzando la potenza estratta tenendo allo stesso tempo conto dei limiti del generatore, questo controllore permette, in fase di dimensionamento e verifica del generatore scelto di scegliere generatori a più basse dimensioni (e conseguenti costi) evitando sovradimensionamenti dovuti all'impossibilità di garantire, istante per istante, tutti i vincoli che il PTO richiederebbe se un controllore PD fosse applicato.

16. Conclusioni

In questo documento è stata descritta l'ottimizzazione del sistema PeWEC e la metodologia di progettazione del sistema di ormeggio del dispositivo che costituisce uno dei sistemi più critici per quanto riguarda le tecnologie di estrazione di energia da moto ondoso. Tramite ottimizzazione tecno-economica del dispositivo è stato identificato un dispositivo ottimale e i suoi parametri inerziali e geometrici principali. Una parte consistente del lavoro riguarda la determinazione di funzioni di costo per il calcolo del CAPEX di un eventuale impianto pilota, considerando come sito di installazione Pantelleria. Il costo stimato di realizzazione e installazione sono nell'ordine del 5 milioni di euro. Risultato fondamentale è stata la stima della suddivisione dei costi dell'impianto pilota, evidenziando così i sistemi che impattano maggiormente sui costi. È stata discussa la fattibilità tecnica della realizzazione dei pendoli tramite uno studio di diverse geometrie e rapporti geometrici. In conclusione, una soluzione conveniente può essere la realizzazione del pendolo in calcestruzzo armato e di forma perpendicolare per abbattere i costi e facilitare il processo di industrializzazione e produzione in scala. Sono stati inoltre identificate soluzioni commerciali per quanto riguarda la scelta del riduttore meccanico e generatori elettrici ed è stato definito lo schema elettrico di base della macchina e gli elementi fondamentali per la connessione a rete.

Infine, sono stati proposti degli sviluppi futuri per la riduzione dei costi del dispositivo o per l'aumento delle prestazioni di estrazione di energia. Nelle seguenti figure vengono riportati dei render che suggeriscono il layout della macchina al vero.



Figura 69 Render del PeWEC. Vista esterna. La linea di galleggiamento è evidenziata dalla separazione dei colori. Sono rappresentati in maniera schematica gli elementi di connessione dell'ormeggio sulla coperta che comprendono i fairlead e chaistopper e fissaggio della catena.

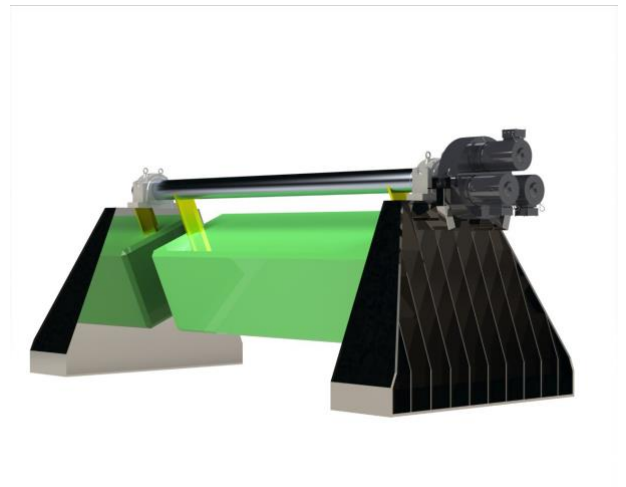
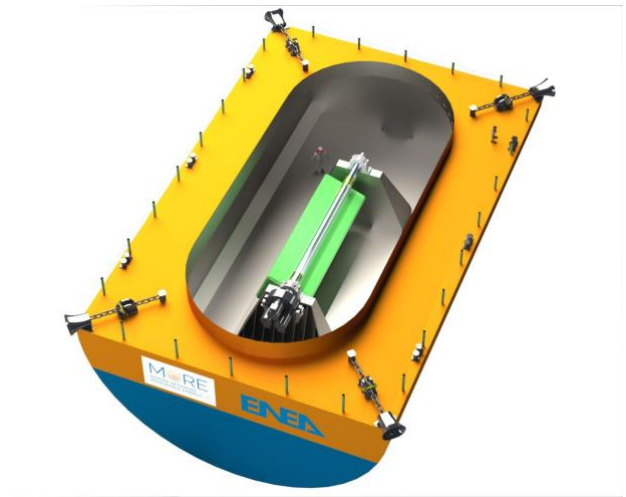
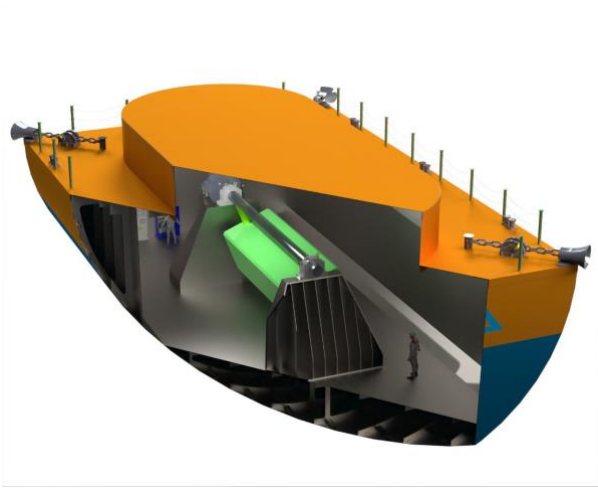


Figura 70 Viste interne del PeWEC. Si evidenziano le nervature di rinforzo dello scafo, I gavoni per l'alloggio della zavorra e l'unità pendolare posta al centro dello scafo.

17. Appendice

17.1. Risultati simulazione dispositivo ottimo a Pantelleria

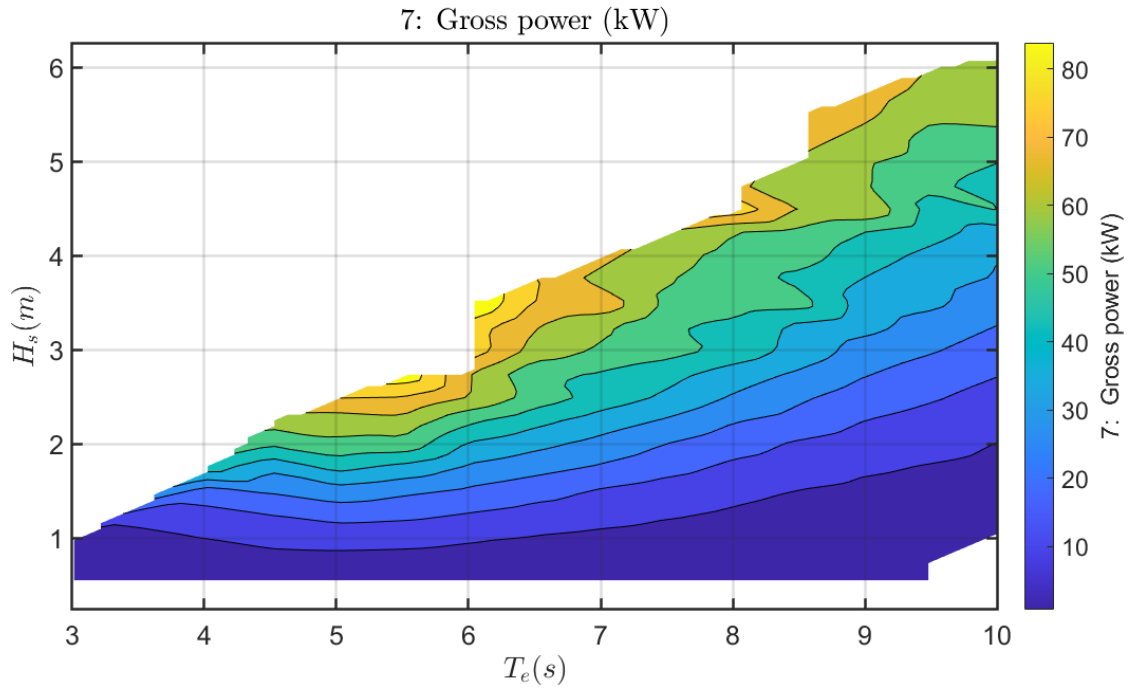


Figura 71 Power Matrix lorda del PeWEC.

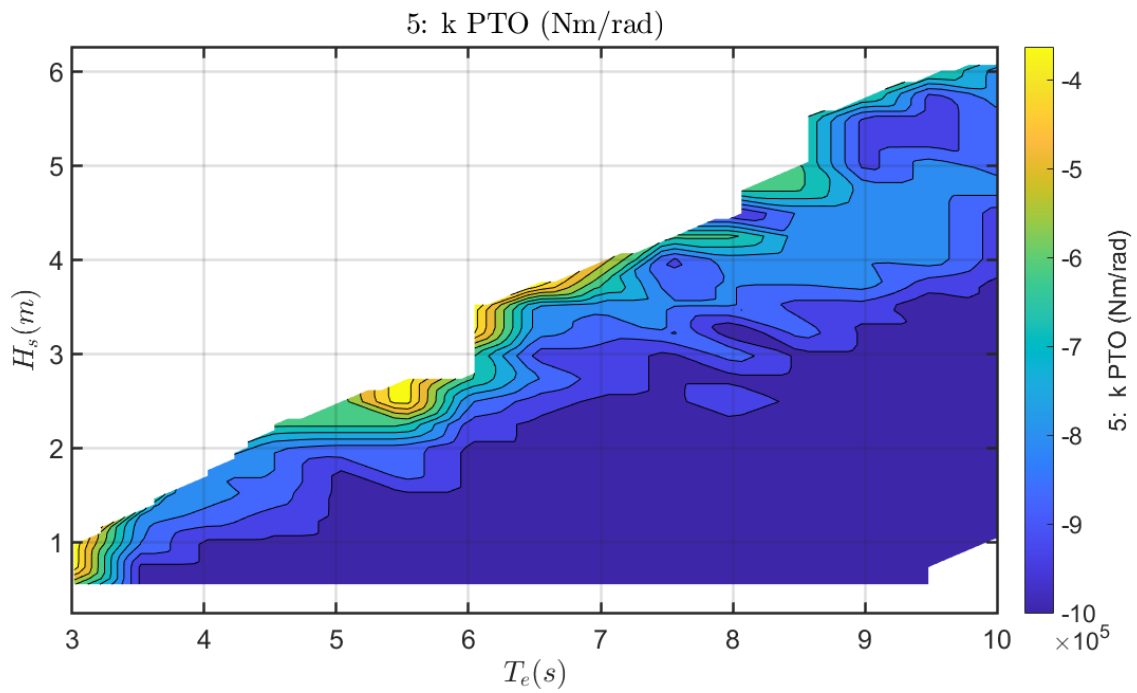


Figura 72 Parametro k di PTO ottimo in funzione dello stato di mare.

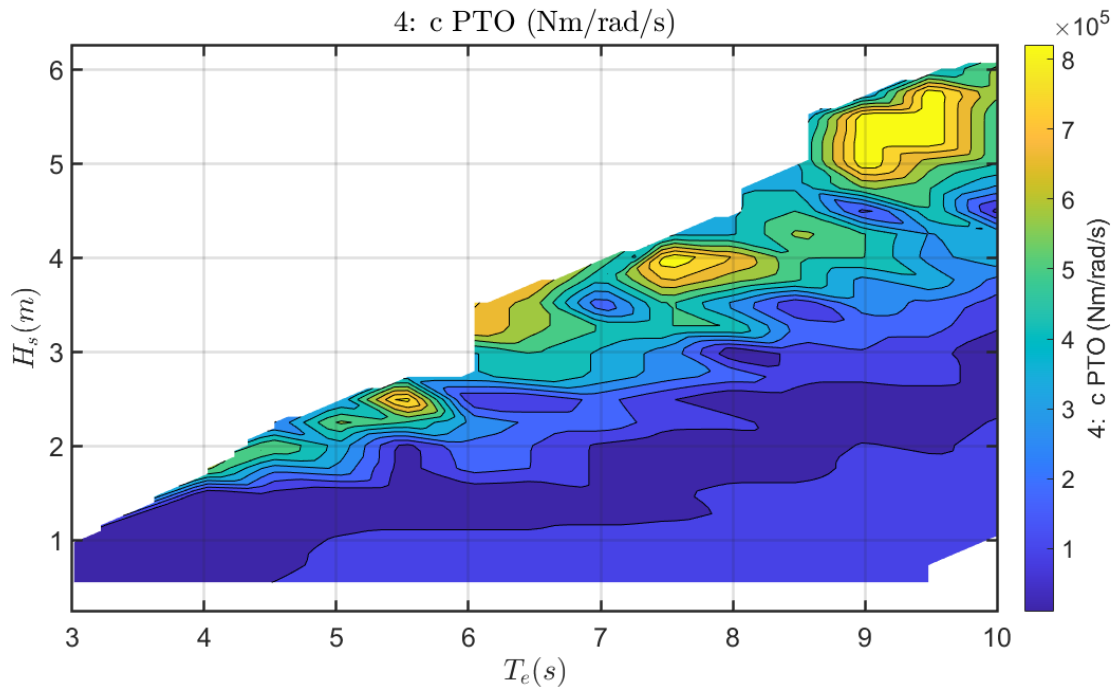


Figura 73 Parametro c di PTO ottimo in funzione dello stato di mare.

17.2. Teoria della probabilità

17.2.1. Probabilità di una variabile casuale

La probabilità di un evento è un numero compreso tra zero e uno che descrive la probabilità che quell'evento si verifichi. Lo zero rappresenta l'impossibilità che quell'evento accada mentre uno rappresenta la certezza. Maggiore è la probabilità di un evento, maggiore è la probabilità che accada [47].

La CDF di una variabile casuale è la probabilità che quella variabile sia uguale o inferiore a un certo valore [48]:

$$F_X(x) = P(X \leq x)$$

Si può anche valutare la probabilità di una variabile di cadere in un certo intervallo come:

$$P(a \leq x \leq b) = F_X(b) - F_X(a)$$

Se la variabile è continua, possiamo definire la PDF di una variabile come:

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx}$$

Quindi, è ovvio che possiamo esprimere il CDF come l'integrale del PDF:

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(t) dt$$

La probabilità che X cada in un certo intervallo (a, b) è:

$$P(a \leq x \leq b) = \int_{-\infty}^b f_X(t) dt - \int_{-\infty}^a f_X(t) dt = \int_a^b f_X(t) dt$$

È facile intuire che la CDF è una funzione monotona crescente che tende a 1. La funzione di distribuzione cumulativa inversa (ICDF) è la funzione inversa che associa un valore alla sua probabilità, data una certa funzione.

17.2.2. Probabilità congiunta di due variabili casuali

Siano X e Y due variabili casuali. La distribuzione di probabilità congiunta per X, Y è la distribuzione di probabilità che fornisce la probabilità delle variabili di rientrare in un determinato intervallo. Questa distribuzione è anche chiamata distribuzione bivariata. La probabilità congiunta può essere espressa come funzione di distribuzione cumulativa congiunta (JCDF) o come funzione di densità di probabilità congiunta (JPDF). La distribuzione marginale di X è la funzione di distribuzione di probabilità quando Y non viene preso in considerazione. Quindi, corrisponde al CDF di quella variabile. In generale, se abbiamo il JPDF di X, Y $f_{X,Y}$ possiamo esprimere le distribuzioni marginali come:

$$F_X(x) = \int f_{X,Y}(y) dy$$

$$F_Y(y) = \int f_{X,Y}(x) dx$$

Se vogliamo esprimere la probabilità di una variabile fissa l'altra, possiamo usare la probabilità condizionata, che è la probabilità di X dato un certo valore di Y.

$$P(X|Y) = \frac{P(X \cap Y)}{P(Y)}$$

Se i due eventi non sono correlati (sono indipendenti. L'evento X non influenza l'evento Y) la probabilità condizionata è uguale alla CDF. Se i due eventi sono correlati la probabilità condizionata viene modificata dalla dipendenza dei due eventi.

17.2.3. Probabilità condizionata di due variabili casuali

Se vogliamo stabilire la probabilità di Y condizionale su X, dobbiamo trovare una correlazione tra i parametri della distribuzione che rappresenta Y e X. Per raggiungere questo obiettivo si può valutare la funzione Y fissato un intervallo di X in modo da stimare i parametri della distribuzione Y relativa al vettore X. Al termine di questa procedura si può trovare una funzione analitica che rappresenti l'andamento della distribuzione dei parametri di Y basata su X. Ad esempio, se vogliamo costruire una distribuzione lognormale per Y condizionale a X, possiamo dire che:

$$F(y|x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{\ln x - \mu(x)}{\sqrt{2}\sigma(x)} \right)$$

La media μ e la deviazione standard sono funzione di x. Per la costruzione di un contorno ambientale considereremo questa distribuzione con parametri pari alla x calcolata.

17.2.4. Correlazione fra due variabili casuali

Esistono diversi modi per valutare la correlazione tra due variabili. Una delle più comuni è la covarianza delle due variabili [49]:

$$\sigma_{XY} = E[(X - \mu_x)(Y - \mu_y)] = E(XY) - \mu_x \mu_y$$

Dove E() è il valore atteso o la media.

Un altro fattore è il fattore di correlazione di Pearson, che è un valore normalizzato della covarianza:

$$\rho = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}$$

Questo coefficiente varia tra -1 e 1. Un valore uguale a 0 significa che non c'è una correlazione tra le due variabili, mentre un valore vicino a ± 1 significa che c'è una forte correlazione tra X, Y.

Un altro parametro utile è il coefficiente di correlazione per ranghi di Kendall, che misura l'associazione ordinale tra due variabili. Il coefficiente Kendall τ è definito come [50]:

$$\tau = \frac{(\text{number of concordant pairs}) - (\text{number of discordant pairs})}{\binom{n}{2}}$$

Dove $\binom{n}{2}$ è il coefficient binomiale.

$$\binom{n}{2} = \frac{n!}{(n-2)!2!}$$

Come la ρ di Pearson, il τ di Kendall deve essere compreso nell'intervallo $-1 \leq \tau \leq 1$.

17.2.5. Trasformazione di NATAF per due CDF

Supponiamo che X_1 e X_2 siano due variabili casuali, con distribuzione marginale F_1 e F_2 . Per eseguire un'analisi di affidabilità come il calcolo di un contorno o di una probabilità di guasto, possiamo utilizzare la Trasformazione di Nataf per completare il modello probabilistico. Un altro modo per chiudere il problema è usare una Copula che correli le due distribuzioni marginali in funzione di un parametro di correlazione. La trasformazione di Nataf [51] può essere interpretata anche come una copula gaussiana. Sia T la composizione di due funzioni tali che:

$$\begin{aligned} T &= T_2 \cdot T_1 \\ T_1: \bar{X} &\rightarrow \bar{Y} = \begin{pmatrix} \phi^{-1}(F_1(X_1)) \\ \phi^{-1}(F_2(X_2)) \end{pmatrix} \\ T_2: \bar{Y} &\rightarrow \bar{U} = \bar{R}\bar{Y} \end{aligned}$$

Assumiamo che \bar{Y} sia un vettore gaussiano con una matrice di correlazione \bar{R} , con media uguale a zero e deviazione standard uguale a uno. ϕ è la CDF e \bar{U} è un vettore gaussiano con la stessa distribuzione marginale di \bar{Y} [51]. Lo scopo della Trasformazione Nataf è trasformare \bar{U} , che appartengono allo spazio standard, in \bar{X} , che appartengono allo spazio fisico. Per definire \bar{U} possiamo scegliere una probabilità di guasto e quindi calcolare il valore del raggio come:

$$\beta = -\phi^{-1}(P_f)$$

P_f è la probabilità di guasto.

$$|\bar{U}| = \beta$$

Quindi, possiamo dire che:

$$\begin{aligned} U_1 &= \beta \cos \theta \\ U_2 &= \beta \sin \theta \end{aligned}$$

θ varia nell'intervallo $[0, 2\pi]$. Per considerare la correlazione tra la variabile calcoliamo il contorno finale considerando le medie e le varianze condizionali [52]:

$$\begin{aligned} X_1 &= F_1^{-1} \left(\phi \left(\frac{x_1 - \mu_1}{\sigma_1} \right) \right) \\ X_2 &= F_2^{-1} \left(\phi \left(\frac{x_2 - \mu_2}{\sigma_2} \right) \right) \end{aligned}$$

Dove μ_i e σ_i sono definiti come [53]:

$$\begin{aligned} \mu_i &= R_{i,i-1} R_{i,i-1}^{-1} \bar{y}_{i-1} (\bar{x}_{i-1}) \\ \sigma_i &= 1 - R_{i,i-1} R_{i,i-1}^{-1} R_{i,i-1}^T \end{aligned}$$

Quindi, per due variabili:

$$\frac{x_1 - \mu_1}{\sigma_1} = u_1$$

$$\frac{x_2 - \mu_2}{\sigma_2} = u_2 \sqrt{1 - \rho_{12}} + \rho_{12} u_1$$

ρ_{12} è il coefficiente di correlazione di Pearson fra Y_1 e Y_2 , corrispondente all'elemento 1,2 della matrice \bar{R} .

17.2.6. Trasformazione dallo spazio standard U allo spazio reale

Supponiamo che X e Y siano due variabili casuali, un altro modo per valutare il contorno è utilizzare l'approccio CMA (Conditional Modeling Analysis). Questo approccio è possibile solo se l'insieme di dati è correlato; quindi, ad ogni valore del vettore X è associato un valore del vettore Y. Con questa ipotesi possiamo correlare i dati e dire che la distribuzione marginale di X è F_X e la distribuzione di Y condizionato a X è $F_{Y|X}$. Lo scopo della trasformazione è trasformare \bar{U} , che appartiene allo spazio standar, in \bar{X} , che appartengono allo spazio fisico, come abbiamo già visto nell'approccio Nataf. Per definire \bar{U} possiamo scegliere una probabilità di guasto e quindi calcolare il valore del raggio come:

$$\beta = -\phi^{-1}(P_f)$$

P_f è la probabilità di guasto.

$$|\bar{U}| = \beta$$

Quindi, possiamo dire che:

$$U_1 = \beta \cos \theta$$

$$U_2 = \beta \sin \theta$$

θ è variabile nell'intervallo $[0, 2\pi]$. Per considerare la correlazione tra la variabile calcoliamo il contorno finale considerando i parametri della $F_{Y|X}^{-1}$ basati per ogni X_β [54]:

$$X_\beta = F_X^{-1}(\phi(u_1))$$

$$Y_\beta = F_{Y|X}^{-1}(\phi(u_2))$$

18. Acronimi

CDF, funzione di probabilità cumulata

PDF, funzione di densità di probabilità

ICDF, funzione inversa di probabilità cumulata

JCDF, funzione di probabilità cumulata congiunta

JPDF, funzione di densità di probabilità congiunta

EC, Environmental Contour.

Hs, Altezza significativa

Te, Periodo energetico

GOF, Goodness of fit

Bibliografia

- [1] S. A. Sirigu, L. Foglietta, G. Bracco, and G. Mattiazzo, “LA1.12: Sviluppo di algoritmi genetici per la progettazione del convertitore,” 2019.
- [2] S. A. Sirigu, P. Dafnakis, and G. Cervelli, “LA1.4: Analisi della risorsa ondosa nei siti di interesse,” 2019.
- [3] G. Mattiazzo *et al.*, “Parte A: Attività sperimentali sul dispositivo PEWEC in scala 1:12,” 2015.
- [4] N. Pozzi, G. Bracco, B. Passione, S. A. Sirigu, and G. Mattiazzo, “PeWEC: Experimental validation of wave to PTO numerical model,” *Ocean Engineering*, vol. 167, pp. 114–129, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.08.028.
- [5] E. Pasta, M. Bonfanti, G. Bracco, and G. Mattiazzo, “LA1.6: Individuazione di leggi di controllo avanzate,” 2019.
- [6] D. G. Gioia, E. Pasta, P. Brandimarte, and G. Mattiazzo, “Data-driven control of a Pendulum Wave Energy Converter: A Gaussian Process Regression approach,” *Ocean Engineering*, vol. 253, p. 111191, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.111191.
- [7] S. Solari, M. Egüen, M. J. Polo, and M. A. Losada, “Peaks Over Threshold (POT): A methodology for automatic threshold estimation using goodness of fit p-value,” *Water Resources Research*, vol. 53, no. 4, pp. 2833–2849, 2017.
- [8] G. Wu and W. Qiu, “Threshold Selection for POT Framework in the Extreme Vehicle Loads Analysis Based on Multiple Criteria,” *Shock and Vibration*, vol. 2018, 2018.
- [9] D. Norske Veritas, “DNV-RP-C205 Environmental conditions and environmental loads,” 2010. [Online]. Available: <http://www.dnv.com>
- [10] “Guide to Wave Analysis and Forecasting,” 2018.
- [11] L. Fingersh, M. Hand, and A. Laxson, “Wind turbine design cost and scaling model,” National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2006.
- [12] R. G. Hekkenberg, “A building cost estimation method for inland ships,” 2014.
- [13] T. F. A. Natarajan, “Innovative Concepts for Floating Structures Partners WP 4 Task 4,” 2014.
- [14] Quoceant Ltd., “PTO SYSTEM COST METRICS PROJECT SECURE-DELIVERABLE 2-4,” 2016. [Online]. Available: www.quoceant.com
- [15] “MARKET AND COST MODELS UPDATE COSTING STEELWORK #17.”
- [16] Quoceant Ltd, “Moorings and Connection Systems Cost Metrics Project secure – deliverable 3-3,” 2015.
- [17] *Anchor manual 2015 : the guide to anchoring.*
- [18] N. Cresswell, J. Hayman, A. Kyte, A. Hunt, and P. Jeffcoate, “Anchor Installation for the Taut Moored Tidal Platform PLAT-O,” in *Proceedings of the 3rd Asian Wave Tidal Energy Conference, Singapore, Singapore*, 2016, pp. 24–28.
- [19] A. Myhr, C. Bjerkseter, A. Ågotnes, and T. A. Nygaard, “Levelised cost of energy for offshore floating wind turbines in a life cycle perspective,” *Renew Energy*, vol. 66, pp. 714–728, 2014.

- [20] American Bureau of Shipping (ABS), "Offshore Anchor Data for Preliminary Design of Anchors of Floating Offshore Wind Turbines Offshore Anchor Data for Preliminary Design of Anchors of FOWTs," 2013. [Online]. Available: www.eagle.org
- [21] "GUIDANCE NOTES ON DESIGN AND INSTALLATION OF DRAG ANCHORS AND PLATE ANCHORS," 2017. [Online]. Available: www.eagle.org
- [22] InterMoor. SEPLA, "The Suction Embedded Plate Anchor provides a lighter and cheaper option to other deepwater mooring solutions."
- [23] O. Choupin, M. Henriksen, A. Etemad-Shahidi, and R. Tomlinson, "Breaking-down and parameterising wave energy converter costs using the CapEx and similitude methods," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 4, p. 902, 2021.
- [24] G. Vissio, "ISWEC toward the sea-Development, Optimization and Testing of the Device Control Architecture", doi: 10.6092/polito/porto/2697259.
- [25] F. E. Marines, "Deliverable 4.6: Framework for the prediction of the reliability, economic and environmental criteria and assessment methodologies for Moorings and Foundations," 2015.
- [26] Quoceant Ltd., "High Level Cost Metrics for WEC machine elements," 2016. [Online]. Available: www.queocean.com
- [27] R. G. Hekkenberg, "A building cost estimation method for inland ships," 2014.
- [28] A. Têtu and J. Fernandez Chozas, "A Proposed Guidance for the Economic Assessment of Wave Energy Converters at Early Development Stages," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 15, p. 4699, 2021.
- [29] Tianna Bloise Thomaz and David Crooks, "Open Sea Operating Experience to Reduce Wave Energy Costs Deliverable D7.3 Tracking metrics for wave energy technology performance (Global LCOE, LCA and SCOPE analysis of OPERA wave energy technology)."
- [30] International Association of Classification Societies, "Anchor Windlass Design and Testing".
- [31] F. Rémoit, M.-A. Chatzigiannakou, A. Bender, I. Temiz, J. Sundberg, and J. Engström, "Deployment and maintenance of wave energy converters at the lysekil research site: A comparative study on the use of divers and remotely-operated vehicles," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 6, no. 2, p. 39, 2018.
- [32] J. T. Joiner, *NOAA diving manual: Diving for science and technology*. National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Oceanic and ..., 2001.
- [33] A. F. X Correia da Fonseca *et al.*, "Title Logistics and Marine Operations Tools-Alpha version."
- [34] C. Anerdi, B. Paduano, P. Casalone, G. Mattiazzo, and L. Giordano, "Design of a Reinforced Concrete Wave Energy Converter in Extreme Wave Conditions," in *International Workshop IFToMM for Sustainable Development Goals*, 2021, pp. 70–77.
- [35] B. Drew, A. R. Plummer, and M. N. Sahinkaya, "A review of wave energy converter technology," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 223, no. 8, pp. 887–902, Dec. 2009, doi: 10.1243/09576509JPE782.

- [36] J. F. Gaspar, M. Calvário, M. Kamarlouei, and C. Guedes Soares, "Power take-off concept for wave energy converters based on oil-hydraulic transformer units," *Renewable Energy*, vol. 86, pp. 1232–1246, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.09.035.
- [37] M. A. Jusoh, M. Z. Ibrahim, M. Z. Daud, A. Albani, and Z. Mohd Yusop, "Hydraulic Power Take-Off Concepts for Wave Energy Conversion System: A Review," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 23, p. 4510, Nov. 2019, doi: 10.3390/en12234510.
- [38] R. H. Hansen, "Design and Control of the PowerTake-Off System for a Wave Energy Converter with Multiple Absorbers," 2013.
- [39] R. Hansen, M. Kramer, and E. Vidal, "Discrete Displacement Hydraulic Power Take-Off System for the Wavestar Wave Energy Converter," *Energies (Basel)*, vol. 6, no. 8, pp. 4001–4044, Aug. 2013, doi: 10.3390/en6084001.
- [40] N. Faedo, S. Olaya, and J. v. Ringwood, "Optimal control, MPC and MPC-like algorithms for wave energy systems: An overview," *IFAC Journal of Systems and Control*, vol. 1, pp. 37–56, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.ifacsc.2017.07.001.
- [41] D. Garcia-Violini, Y. Pena-Sanchez, N. Faedo, C. Windt, F. Ferri, and J. v. Ringwood, "Experimental Implementation and Validation of a Broadband LTI Energy-Maximizing Control Strategy for the Wavestar Device," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 29, no. 6, pp. 2609–2621, Nov. 2021, doi: 10.1109/TCST.2021.3052479.
- [42] G. Li and M. R. Belmont, "Model predictive control of sea wave energy converters – Part I: A convex approach for the case of a single device," *Renewable Energy*, vol. 69, pp. 453–463, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.03.070.
- [43] N. Pozzi, "Numerical Modeling and Experimental Testing of a Pendulum Wave Energy Converter (PeWEC)," Politecnico di Torino, 2018.
- [44] A. Mason, "Marine Energy Electrical Architecture, Report 1: Landscape Map and Literature Review," 2015.
- [45] L. Latrasse, "Wate-mate connector Market study," 2014.
- [46] F. Sharkey, "Offshore Electrical Networks and Grid Integration of Wave Energy Converter Arrays - Techno-economic Optimisation of Array Electrical Networks, Power Quality Assessment, and Irish Market Perspectives," Technological University Dublin, 2015.
- [47] O. Kallenberg and O. Kallenberg, *Foundations of modern probability*, vol. 2. Springer, 1997.
- [48] K. il Park and M. Park, *Fundamentals of probability and stochastic processes with applications to communications*. Springer, 2018.
- [49] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied statistics and probability for engineers*. John Wiley & Sons, 2010.
- [50] R. Nelsen, "Kendall tau metric, Hazewinkel, Michiel, Encyclopedia of Mathematics," Springer, 2001.
- [51] R. Lebrun and A. Dutfoy, "An innovating analysis of the Nataf transformation from the copula viewpoint," *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 24, no. 3, pp. 312–320, 2009.

- [52] F. Silva-González, E. Heredia-Zavoni, and R. Montes-Iturrizaga, "Development of environmental contours using Nataf distribution model," *Ocean Engineering*, vol. 58, pp. 27–34, 2013.
- [53] A. Papoulis, *Random variables and stochastic processes*. McGraw Hill, 1965.
- [54] D. Norske Veritas, "RECOMMENDED PRACTICE ENVIRONMENTAL CONDITIONS AND ENVIRONMENTAL LOADS," 2010. [Online]. Available: <http://www.dnv.com>