

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali*

*CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE*

TESI DI LAUREA  
IN COASTAL ENGINEERING

**DINAMICA DI CORPI GALLEGGIANTI IN MARE  
MEDIANTE PROVE DI LABORATORIO E FATTIBILITÀ DI WEC A SALINA**

CANDIDATO:  
Giorgio Montemaggiore

RELATORE:  
Prof. Ing. Renata Archetti

CORRELATORE:  
Dr. Ing. Maria Gabriella Gaeta

Anno Accademico 2018/19

Sessione I



# INDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>SOMMARIO</b> .....  | <b>1</b>  |
| <b>1. INTRODUZIONE</b> .....   | <b>4</b>  |
| 1.1 OGGETTI GALLEGGIANTI E LORO UTILIZZO IN INGEGNERIA OFF-SHORE .....             | 4         |
| 1.2 MOTIVAZIONI DELLO STUDIO .....   | 9         |
| <b>2. DESCRIZIONE DELLE PROVE IN LABORATORIO</b> .....                             | <b>10</b> |
| 2.1 OGGETTI GALLEGGIANTI .....   | 12        |
| 2.2 STRUMENTI DI MISURA .....  | 15        |
| 2.2.1 <i>SONDE</i> .....   | 15        |
| 2.2.2 <i>VIDEOCAMERE GO-PRO</i> .....  | 16        |
| 2.2.3 <i>TEST EFFETTUATI</i> .....   | 16        |
| <b>3. RISULTATI SPERIMENTALI</b> .....   | <b>19</b> |
| 3.1 ANALISI DELLE SONDE.....   | 19        |
| 3.2 ANALISI RIFLESSIONE E TRASMISSIONE.....  | 23        |
| 3.3 ANALISI TRAMITE VIDEO DELLA DINAMICA DEGLI OGGETTI GALLEGGIANTI.....           | 30        |
| 3.3.1 <i>EDITING DEI FILMATI GOPRO</i> .....                                       | 30        |
| 3.3.2 <i>IDENTIFICAZIONE DEL CILINDRO TRAMITE CLUSTER DI PUNTI</i> .....           | 36        |
| 3.3.3 <i>RISULTATI SPERIMENTALI DELLA DINAMICA DEL CILINDRO GALLEGGIANTE</i> ..... | 40        |
| <b>4. ANALISI DI FATTIBILITÀ DI WEC A SALINA</b> .....                             | <b>48</b> |
| 4.1 PROGETTO “CLEAN ENERGY FOR EU ISLANDS”: SALINA ISOLA SOSTENIBILE .....         | 48        |
| 4.2 INQUADRAMENTO DEL SITO .....   | 50        |
| 4.3 ANALISI DEI DATI ONDOSI.....   | 53        |
| 4.4 MODELLAZIONE DEL CLIMA ONDOSO VERSO RIVA .....                                 | 56        |
| 4.5 MATRICI DI POTENZA E PRODUCIBILITÀ DEI WEC .....                               | 61        |
| <b>5. CONCLUSIONI</b> .....  | <b>66</b> |
| <b>6. BIBLIOGRAFIA</b> .....   | <b>69</b> |
| <b>APPENDICE A. DATI DELLE PROVE DI LABORATORIO</b> .....                          | <b>71</b> |
| <b>APPENDICE B. MATRICI DI POTENZA</b> .....                                       | <b>74</b> |
| B.1 MATRICI DI POTENZA ORIGINARIE FORNITE DAL COSTRUTTORE <sup>[17]</sup> .....    | 74        |
| B.2 MATRICI DI POTENZA PER I DISPOSITIVI DIMENSIONATI NEL MAR MEDITERRANEO. ....   | 78        |

## SOMMARIO

Lo studio della dinamica di oggetti galleggianti in mare soggetti all'azione delle onde è stato oggetto della presente tesi, in cui analisi di prove di laboratorio in canale e studio di fattibilità di convertitori di energia da onde sono stati svolti al fine di migliorare la conoscenza e l'applicabilità di approcci scientifici in tale ambito.

Le prove sono state effettuate nel canale del Laboratorio di Ingegneria Idraulica LIDR del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali, DICAM, dell'Università Alma Mater Studiorum di Bologna, al fine di valutare la dinamica di un corpo galleggiante, quale un box e un cilindro, quest'ultimo oggetto di studio.

I due oggetti, che presentano diverse configurazioni in base al tipo di ancoraggio e di affondamento, sono stati sottoposti all'azione di onde regolari ed irregolari generate tramite il battionde posto nella sezione iniziale del canale.

L'analisi dei dati, in primo luogo, ha permesso di ricavare i valori dell'altezza d'onda significativa misurata dalle sonde resistive presenti lungo il canale, al fine di identificare i coefficienti di riflessione e trasmissione dell'onda dovuti all'oggetto. Lo studio della dinamica del corpo cilindrico è stato svolto mediante l'analisi delle immagini acquisite da 2 videocamere. Sono state analizzate, in particolare, i risultati delle prove con due onde significative caratterizzate da  $H_s=36$  mm e 45 mm per tutte le configurazioni del cilindro realizzate, cioè con diverso sistema di ancoraggio e di affondamento. È stato effettuato un processo di ricampionamento dei video acquisiti e ottenuti i parametri di calibrazione, contenuti nella matrice di traslazione e rotazione della camera. Sono inoltre state eseguite le analisi dinamiche individuando la posizione dell'oggetto tramite un cluster di punti e la variazione del suo baricentro nel tempo. Individuando anche in alcuni casi la posizione della superficie libera, durante l'attacco ondoso, è stato possibile valutare lo spostamento del cilindro nella direzione del moto (surge) e nella direzione verticale (heave).

Tali analisi sono state effettuate anche nel caso di oscillazione libera dell'oggetto senza ancoraggio, allo scopo di verificare la frequenza propria del galleggiante.

La seconda parte del presente lavoro è stata invece incentrata sulla verifica di fattibilità di convertitori di energia da moto ondoso (WEC) nei pressi dell'isola di Salina, appartenente all'arcipelago delle isole Eolie, in Sicilia, verificando la

producibilità annuale di alcuni dispositivi galleggianti. Il sito di installazione, scelto nell'ambito del programma “*Clean Energy for EU Islands Secretariat*”, è in prossimità della costa Est del Comune isolano di Malfa, in corrispondenza di un fondale di 20 m.

Per effettuare le analisi di producibilità sulla base di una statistica del clima ondoso della zona, sono stati utilizzati i dati ondosi di 12 anni da modello hindcast (dal 2006 al 2018) del Servizio Europeo di Monitoraggio Ambientale Marino, Copernicus, estratti a largo dell'isola. È stato implementato il modello numerico MIKE21 per trasferire i dati da largo a riva, nella zona prevista per l'installazione, e utilizzando una batimetria dettagliata della zona ottenuta dal portale europeo EMODnet. Dai risultati della simulazione, è stato possibile ricavare le frequenze di accadimento degli eventi suddivisi per classe di riferimento ( $H_s$  e  $T_p$ ).

Scelti alcuni dispositivi WEC di cui sono note le caratteristiche e le matrici di potenza da letteratura, quali AquaBuOY, Langlee, OEbuoy, Pelamis, Pontoon, SeaPower, Wavebob, le rispettive matrici di potenza sono state scalate di un fattore  $\lambda^{7/2}$  secondo la similitudine di Froude al fine di adattarle alle condizioni climatiche del Mar Mediterraneo. Inoltre sono stati analizzati anche due dispositivi, moonWEC e HPA-LG seabed, progettati per il Mar Mediterraneo. Per ciascuno dei dispositivi, è stata stimata l'energia annualmente producibile e il rendimento della macchina per le condizioni di Salina, verificandone la fattibilità di installazione.

L'approccio utilizzato e descritto nella presente tesi costituisce un esempio di metodo integrato tra prove sperimentali e modellazione numerica al fine di migliorare la conoscenza in un settore nuovo quale quello della Blue Energy.



# 1. INTRODUZIONE

## 1.1 OGGETTI GALLEGGIANTI E LORO UTILIZZO IN INGEGNERIA OFF-SHORE

Le strutture galleggianti svolgono oggi un ruolo importante nel mondo e, nel campo dell'ingegneria costiera, sono utilizzate per diversi scopi quali fondazioni delle piattaforme Oil & Gas, moli dei porti, frangiflutti, fondazioni delle pale eoliche e per le nuove tecnologie di convertitori di energia da moto ondoso (d'ora in avanti, WEC – Wave Energy Converter). Ognuna di queste tecnologie ha una distinta funzione e possono essere installate sia vicino la costa che in acque profonde.

Le strutture galleggianti installate in acque poco profonde o profonde possiedono caratteristiche tecniche e problemi simili, dovuti principalmente ai carichi ondosi cui sono sottoposte e alle tensioni esercitate sui sistemi di ancoraggio. Quest'ultimo problema presenta delle criticità molto forti anche per le strutture galleggianti sotto costa, che sono ancora oggetto di studio da parte degli ingegneri costieri.

Le strutture galleggianti particolarmente utilizzate in acque profonde sono quelle ad uso petrolifero come: l'unità galleggiante di produzione, stoccaggio e scarico (FPSO), le piattaforme semi-sommergibili, le Spar Platform e le Tension Leg Platform (TLP).

Per ogni struttura i tipi di galleggianti potrebbero essere distinti in base a diverse caratteristiche quali funzionalità, stabilità, movimenti, capacità di carico o di volume, trasportabilità e riutilizzabilità. Ognuno ha una differenza significativa in termini di driver di progettazione, prestazioni, costruzione e installazione.

La FPSO è un tipo di nave o un'unità galleggiante utilizzata nell'industria petrolifera per la produzione e lo stoccaggio offshore di petrolio e/o di gas naturale e la distribuzione del petrolio prodotto sulle navi-appoggio. Ha un pescaggio relativamente poco profondo, ma una grande area idrovolante. Offre un'ampia area per le strutture di processo e grandi volumi di archiviazione.

Le piattaforme petrolifere semi-sommergibili hanno una piccola area idrovolante e un pescaggio moderato.

Le Spar sono principalmente utilizzate come piattaforme di produzione e si sono sviluppate come alternativa alle tradizionali piattaforme per fondali molto profondi.

Infatti la struttura consiste in un cilindro galleggiante di grande diametro ancorato al fondale. Possiede un'area idrovolante da moderata a piccola.

La TLP è una tipologia di piattaforma petrolifera galleggiante utilizzata per fondali profondi, generalmente tra i 300 e i 1500 metri. Questa tipologia di piattaforma è utilizzata anche per ospitare turbine eoliche. La caratteristica peculiare delle TLP consiste nella presenza dei tiranti, che, grazie alla relativamente alta rigidità assiale, elimina teoricamente ogni movimento verticale della piattaforma.

Si riportano in Figura 1 due esempi di piattaforme appena descritte:

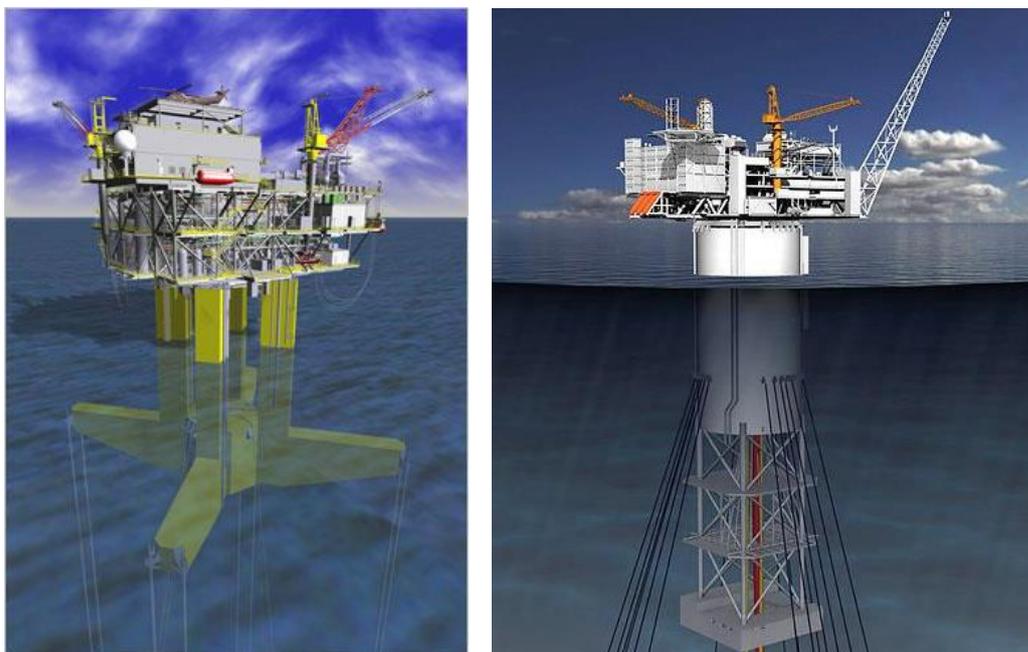


Figura 1 - Esempi di Tension Leg Platform<sup>[20]</sup> (a sinistra) e Spar platform<sup>[19]</sup> (a destra).

Come detto queste strutture sono state e sono tuttora molto utilizzate, ma a causa dei cambiamenti climatici degli ultimi anni e al conseguente innalzamento del livello del mare e all'effetto serra causato dai gas tossici, la politica dei governi di tutto il mondo sta spingendo al passaggio dai combustibili fossili alle energie rinnovabili. Tali energie, grazie alla capacità di autorigenerazione, sono considerate inesauribili. A tal riguardo l'Unione Europea è stata uno dei leader in questo processo, presentando nel 2010 un piano ambizioso nel quadro della strategia *Europa 2020* per limitare gli effetti dei cambiamenti climatici. Entro il 2020 infatti, le emissioni di gas serra dovrebbero ridursi del 20% rispetto al 1990, di cui un 20% di energia dovrebbe provenire da fonti rinnovabili, e ci dovrebbe essere un aumento dell'efficienza energetica del 20% (obiettivo ricordato come 20-20-20). Per raggiungere tale

obiettivo il campo delle *Blue Energy* e, in particolare, la ricerca sulle risorse energetiche rinnovabili ha sviluppato diversi dispositivi capaci di sfruttare le fonti a disposizione che sono: geotermia, biomassa, energia solare, idroelettrica, vento, onde e correnti marine.

Per quanto riguarda il campo eolico, le prime turbine furono fatte a terra ma a causa della crescente richiesta di energia e quindi dell'espansione dei parchi eolici sono stati riscontrati degli ostacoli dovuti principalmente all'impatto ambientale nonché visivo e acustico. Perciò negli ultimi anni si è incominciato a pensare ad un'alternativa meno impattante tale da sfruttare al meglio l'energia producibile. Per questo motivo sono state sviluppate tecnologie galleggianti da installare in mare cercando di sfruttare al meglio le risorse da aree offshore e acque profonde, in cui le aree di installazione sono meno restrittive. Inoltre in queste aree l'energia producibile non solo è inesauribile ma è continua, dato che non vi sono dispersioni. Per cui non c'è necessità di eventi climatici specifici del sito al fine di garantire la presenza di onde o di vento. Ed è anche per tal motivo che sono stati sviluppati i primi dispositivi per sfruttare l'energia da moto ondoso e da correnti marine.

Le turbine eoliche installate a largo possono essere fisse, hanno differenti tipi di fondazione (monopila, gravity based, bucket, tripod, jacket) a cui è collegata la turbina cilindrica a seconda che si tratti di acque basse o profonde, oppure galleggianti installate in acque molto profonde. Queste ultime sono ancora in fase di progettazione concettuale a causa di alcune dinamiche irrisolte dovute principalmente alla stabilità contro vento. È nata una grande sfida ingegneristica per mettere a punto un dispositivo tale da resistere ai carichi elevatissimi e sopperire al problema del galleggiamento. Sono state definite dalla Equinor (ex Statoil azienda petrolifera norvegese) alcune strutture galleggianti che hanno la capacità di incamerare acqua al loro interno in modo tale da bilanciare la struttura. Altro problema è legato agli ancoraggi, come detto in precedenza, e al fenomeno del *biofouling* dovuto all'accumulo, crescita, progressiva "colonizzazione" e corrosione, da parte di organismi uni o pluricellulari, vegetali o animali (molluschi, spugne o alghe), della superficie della struttura galleggiante.

Si riporta in Figura 2 la classificazione delle turbine eoliche in mare:



Figura 2 - Classificazione turbine eoliche fisse e galleggianti <sup>[20]</sup>.

Anche nel campo dell'energia da moto ondoso, i convertitori galleggianti a disposizione sono ancora in fase di sperimentazione. Tali convertitori, denominati Wave Energy Converter (WEC), possono essere installati anche in acque basse poiché, grazie all'utilizzo di modelli numerici sofisticati, è possibile avere una previsione accurata della propagazione dell'onda da largo, dove essa si genera a seguito dell'attrito del vento sulla superficie marina, a riva.

Sono stati stabiliti diversi modi per catalogare il numero sempre crescente di dispositivi <sup>[22]</sup>. Uno dei modi più elementari li classifica in base alla loro posizione di schieramento: nella battigia, vicino la riva e a largo. Un altro modo per distinguere i WEC è quello di organizzarli in base alla loro dimensione e orientamento rispetto al fronte d'onda (vedi Figura 3). Un dispositivo con dimensioni tipiche ridotte rispetto alla lunghezza d'onda incidente è comunemente indicato come *Point Absorber*; se questo dispositivo ha più di un corpo che interagisce, allora si può classificare come un sistema *Multi-body*. Tali dispositivi riescono a sfruttare l'onda da ogni direzione possibile (per esempio l'AquaBuOY e il Wavebob). Se la dimensione tipica del dispositivo è dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda incidente, ma nessuna direzione predomina su l'altra, viene adottato il nome di *Larger Absorber*. Inoltre, se c'è un orientamento predominante del dispositivo rispetto al fronte d'onda, la classe cambia.

Infatti se l'orientamento del prototipo è perpendicolare al fronte d'onda, il dispositivo è denominato *Attenuator*. Si tratta in questo caso di una zattera articolata, come per esempio il Pelamis. Se invece l'orientamento del dispositivo è parallelo al fronte d'onda diventa un dispositivo *Terminator*. In tal modo l'onda impatta la struttura la quale cerca di assorbire tutta l'energia ondosa possibile (un esempio è il Wave Dragon).

Un ulteriore metodo (Falcao, 2010) divide i convertitori in tre classi principali, le colonne d'acqua oscillanti (OWC), i corpi oscillanti e i dispositivi Overtopping. Viene applicata una sotto-classificazione, che divide i prototipi in base al tipo di struttura, mobile (galleggiante) o fissa (al fondale oppure nei frangiflutti dei porti). Ed infine, viene eseguita un'ultima suddivisione rispetto al movimento utilizzato per la conversione in elettricità.

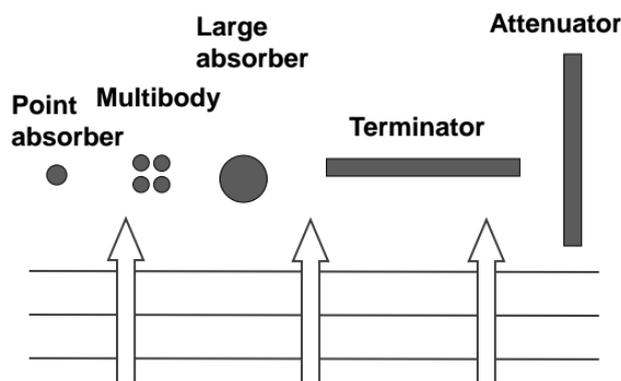


Figura 3 - Classificazione dei Wave Energy Converters in base alle dimensioni dell'oggetto e all'orientamento del fronte d'onda <sup>[22]</sup>.

Dunque, secondo quanto detto, le turbine eoliche sono una tecnologia abbastanza consolidata ed in grado di produrre molta energia, ma quelle galleggianti, più convenienti da diversi punti di vista, presentano ancora delle forti criticità di costruzione e sono in fase di sviluppo. I WEC sono anch'essi in fase di sperimentazione e presentano delle criticità; si contano diverse installazioni soprattutto nei Paesi del Nord Europa in cui è maggiore la risorsa energetica (la potenza producibile ammonta ai 10-30 kW/m). Nel Mediterraneo invece ammonterebbe a circa 4-11 kW/m con picchi di 9-10 kW/m nella costa Ovest della Sardegna (Alghero sito più energetico) e della Sicilia.

La modellazione fisica in scala di laboratorio è ancora il metodo chiave nella progettazione delle strutture oceaniche.

Inoltre per far fronte alla forte variabilità di queste risorse e alla scarsa produzione di energia di alcuni siti si è cercato negli ultimi anni di mettere a punto strutture galleggianti, denominate *multi-use off-shore platform*, capaci di sfruttare più fonti di energia contemporaneamente, tra cui moto ondoso, vento ed energia solare.

Si riporta in Figura 4 un esempio di piattaforma concepita per questo scopo:



Figura 4 – Schema di un dispositivo W<sup>2</sup>Power, combina turbine eoliche e WEC di tipo Point Absorber in una piattaforma semi-sommersibile<sup>[20]</sup>.

## 1.2 MOTIVAZIONI DELLO STUDIO

A fronte di quanto detto, lo studio proposto ha l'obiettivo di analizzare la dinamica e la stabilità di un corpo cilindrico galleggiante soggetto a carico ondoso, che potrebbe rappresentare una semplificazione, a scala ridotta, degli oggetti galleggianti finora discussi. Le analisi di laboratorio sono state effettuate al fine di ottenere un database per diversi oggetti galleggianti (box e cilindro fino ad ora testati) e per diverse configurazioni dell'oggetto stesso in base all'ancoraggio utilizzato (cavo obliquo o verticale, catenaria) e all'affondamento (sommerso, emerso, a pelo d'acqua).

Ponendo l'attenzione sui dispositivi WEC per sfruttare l'energia rinnovabile da moto ondoso, lo studio è stato incentrato sulla verifica di fattibilità nell'isola di Salina. L'obiettivo è stato quello di installare dispositivi capaci di ridurre al minimo le emissioni di CO<sub>2</sub> e i WEC sono una buona opportunità. Vedremo però che non sempre ciò è possibile a causa di diversi fattori ostacolanti.

## 2. DESCRIZIONE DELLE PROVE IN LABORATORIO

Oggetto di questa tesi è l'analisi dei dati ricavati da prove sperimentali eseguite nel Laboratorio di Ingegneria Idraulica – LIDR – del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali, DICAM, dell'Università Alma Mater Studiorum di Bologna.

Le prove sono state effettuate nel canale di lunghezza di 10 m, altezza di 0.7 m e larghezza pari a 0.5 m, dotato di un generatore di onde da un lato e di un sistema assorbitore dall'altro. Nello specifico il canale (vedi Figura 5 e Figura 6) è costituito da un telaio in acciaio poggiato su una struttura mobile che, grazie a due motori, consente di variarne l'altezza mantenendolo orizzontale, oppure, azionando uno solo dei due motori permette di inclinarlo di una quantità nota (fino ad una pendenza del 10%).

Il suo riempimento è reso possibile dal serbatoio posto ad una estremità del canale, con il quale è in connessione idraulica (li separa una sola paratoia verticale apribile manualmente) in modo tale che i livelli di serbatoio e canale si eguagliano una volta raggiunto l'equilibrio.

Al di sotto del canale, è presente uno scavo sagomato in calcestruzzo profondo circa 1.2 metri, nel quale viene fatta defluire l'acqua durante lo svuotamento del canale in modo tale che possa essere reimpressa nel sistema di ricircolo del laboratorio.

L'afflusso di acqua nel canale è regolato da un sistema di pompe, condotti e valvole, le quali, se correttamente manovrate, consentono di riempire il canale in modo graduale ed in totale sicurezza.



Figura 5 - Canale di generazione del Laboratorio di Idraulica LIDR UNIBO.

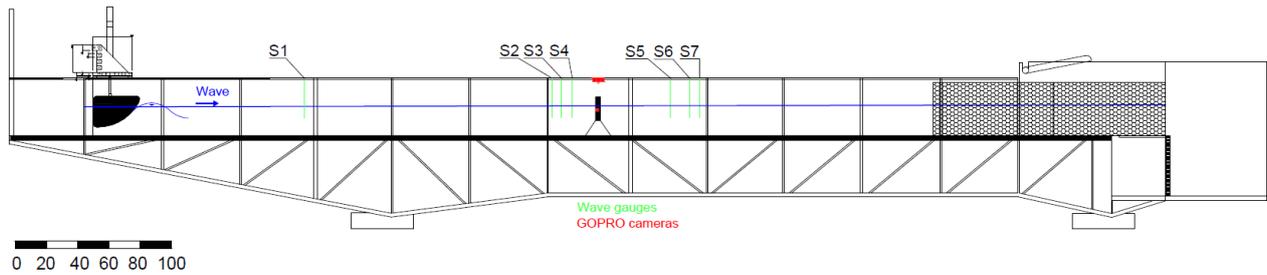


Figura 6 - Modello in scala del canale di generazione, misura in cm.

Il principio di funzionamento del sistema di generazione è basato sull'azione di un *paddle*, o battionde, posto all'estremità di monte del canale (vedi Figura 6), che, oscillando in direzione verticale, induce la formazione dell'onda desiderata. Tale movimento è reso possibile dal pistone che lo sostiene, il quale riceve un segnale lanciato manualmente dal software Indraworks, che gli impone i movimenti fissati, per il tempo impostato, generando così onde di moto laminare che si propagano lungo tutto il canale.

Il battionde in lamiera è sagomato appositamente per ridurre al minimo le turbolenze locali ed è cavo al suo interno per consentirne il galleggiamento quando non è attivo l'impulso di potenza e ridurre la torsione sull'asse del pistone.

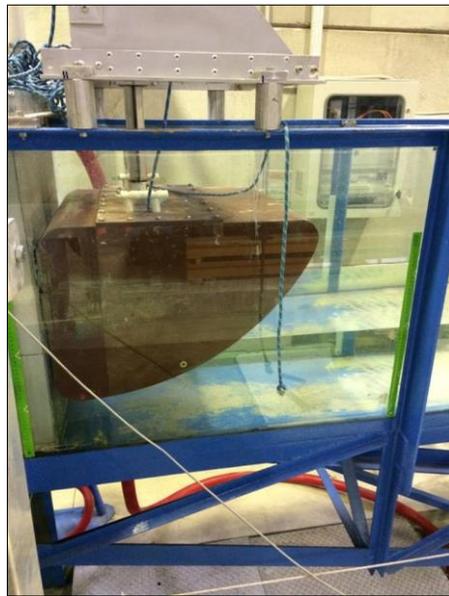


Figura 7 – Dispositivo battionde.

All'estremità di valle, invece, è posizionato un assorbitore alveare costituito da pacchi lamellari in polipropilene stampati a iniezione la cui porosità permette di ridurre il fenomeno della riflessione ondosa.

Il blocco utilizzato per gli esperimenti ha le dimensioni di (0.49 x 0.65 x 1.5) m ed è mantenuto fermo in sede tramite una piastra metallica di carico.



Figura 8 – Assorbitore alveare in polipropilene.

## 2.1 OGGETTI GALLEGGIANTI

Nelle prove di laboratorio sono stati utilizzati due oggetti galleggianti:

- Box: in materiale plastico con placca di ottone, posta all'estremità inferiore dell'oggetto, per permetterne l'affondamento e favorirne la stabilità.

Il box è ancorato al fondo tramite cavi (obliqui, verticali o catenarie a seconda dei casi).

Le caratteristiche del Box sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1 - Caratteristiche del box.

| Dimensioni box: |        | Peso box:      |          |
|-----------------|--------|----------------|----------|
| lunghezza       | 15 cm  | massa plastica | 237.72 g |
| profondità      | 10 cm  | massa ottone   | 578.90 g |
| altezza         | 8 cm   | massa totale   | 816.56 g |
| spessore placca | 1.6 cm |                |          |

- Cilindro: in materiale plastico con blocco in ottone posto nell'estremità inferiore, utilizzato per permettere l'affondamento. Il cilindro è ancorato al fondo tramite cavi (obliqui o catenarie a seconda dei casi).

Le caratteristiche del cilindro sono riportate in Tabella 2.

Tabella 2 - Caratteristiche del cilindro.

| Peso cilindro: |        |   | Posizione baricentro: |       |    |
|----------------|--------|---|-----------------------|-------|----|
| massa plastica | 187.79 | g | zCG plastica          | 16.50 | cm |
| massa ottone   | 413.21 | g | zCG ottone            | 34.25 | cm |
| massa totale   | 601.00 | g | zCG totale            | 28.70 | cm |

|                             |    |    |
|-----------------------------|----|----|
| <b>Lunghezza catenarie:</b> | 35 | cm |
|-----------------------------|----|----|

La posizione del baricentro per il corpo plastico, in ottone e complessivo dell'oggetto è stata presa rispetto alla quota zero fissata in corrispondenza del fondo del canale (vedi Figura 10).

Gli ancoraggi al fondo, sia per il box che per il cilindro, sono collegati ad una piastra forata in plexiglass (in Figura 9), in modo tale da poter posizionare gli oggetti galleggianti all'interno del canale a seconda della configurazione da analizzare. Viene riportato soltanto il dettaglio geometrico del cilindro, dato che verrà analizzato questo oggetto nella tesi.

Le dimensioni del cilindro sono riportate nelle Figura 9 e Figura 10, con dettaglio dell'anello per fissare gli ancoraggi in Figura 11.

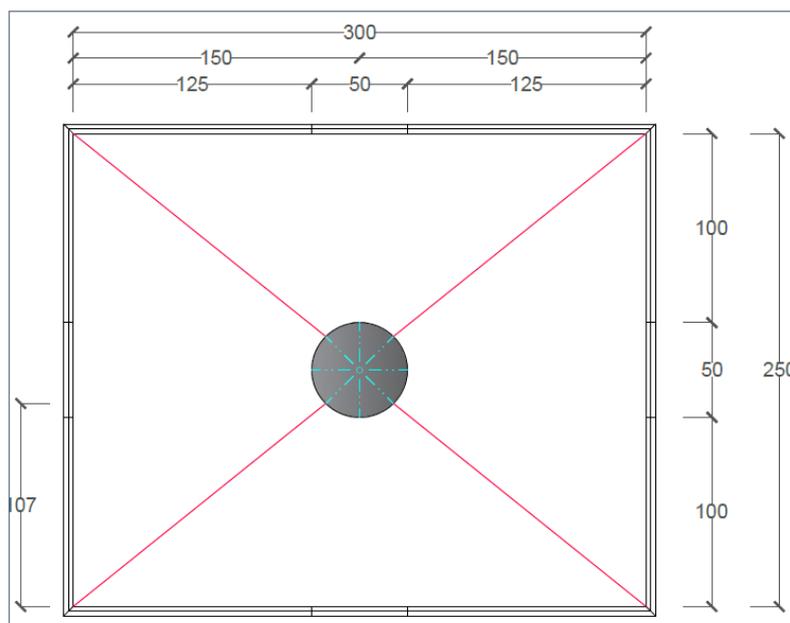


Figura 9 - Vista dall'alto del cilindro. Misure in mm.



## 2.2 STRUMENTI DI MISURA

### 2.2.1 SONDE

Al fine di misurare in continuo il livello dell'acqua nel canale sono state utilizzate sonde resistive. Le sonde sono costituite da due cilindri sottili di metallo, fissati rigidamente in modo tale che si mantengano verticali e paralleli a distanza nota, collegati ai due estremi, in modo tale da formare un circuito caricato da una tensione a corrente alternata. Disposte lungo il canale (vedi Figura 6) sono agganciate superiormente ad un travetto in alluminio, poggiato su due bracci perpendicolari al canale e fissati al telaio. Per un corretto funzionamento le sonde sono posizionate in modo tale che la loro punta rimanga completamente immersa nel fluido per ogni condizione ondosa (sia in fase di cresta che di cavo).

Le sonde sono sette:

- la prima sonda, S1 in Figura 6, posta a 211 cm dal battionde, misura l'altezza d'onda incidente in fase di generazione;
- la seconda, terza e quarta, S2, S3 e S4 in Figura 6, sono disposte di fronte l'oggetto rispettivamente a 522, 536 e 555 cm dal battionde e sono state utilizzate per stimare il coefficiente di riflessione dell'oggetto;
- la quinta, sesta e settima, S5, S6 e S7 in Figura 6, sono disposte dietro l'oggetto rispettivamente a 807, 813, 837 cm dal battionde e sono state utilizzate per stimare il coefficiente di trasmissione dell'oggetto.

Dato che le sonde registrano il livello del liquido in Volt, per passare al dato in mm è stato necessario calibrare le sonde. La calibrazione è stata effettuata imponendo un livello "zero" del liquido, corrispondente alla condizione di quiete in canaletta ( $h=400$  mm), e variando la posizione del traverso (e quindi delle sonde) verticalmente al di sopra o al di sotto del livello fissato. Per l'acquisizione dei segnali è stato utilizzato il software Labview e tramite successiva analisi del segnale acquisito in Matlab è stata effettuata la conversione in mm (vedi Capitolo 3.1 Analisi sonde).

Poiché le sonde sono estremamente sensibili alle variazioni di temperatura e densità dell'acqua la calibrazione è stata effettuata una volta all'inizio di ogni giornata.

## 2.2.2 VIDEOCAMERE GO-PRO

In corrispondenza della posizione dell'oggetto galleggiante sono state poste due videocamere go-pro (Figura 6) che registrano dall'inizio alla fine ogni prova effettuata. Nello specifico la prima go-pro è posizionata sopra l'oggetto e ne registra i movimenti dall'alto (GP1), la seconda invece, sempre in corrispondenza dell'oggetto, è posizionata lateralmente al canale (GP2). Entrambe sono posizionate all'esterno del canale.

## 2.2.3 TEST EFFETTUATI

I test sono stati effettuati dal 7/05/2018 al 21/06/2018 testando onde regolari e irregolari su diverse configurazioni dell'oggetto galleggiante.

Le Tabella 3 e Tabella 4 riassumono le condizioni ondose riprodotte durante le prove.

Per ogni onda di target è fornita la ripidità  $s_{op}$ , la lunghezza dell'onda  $L_0$ , l'altezza dell'onda  $H_s$  generata dal battionde, il periodo di picco  $T_p$ , e la durata dell'attacco ondoso, pari a 2 min per onde regolari e a 12 min per onde irregolari.

L'altezza del livello di acqua in canale è stata conservata sempre uguale a 400 mm.

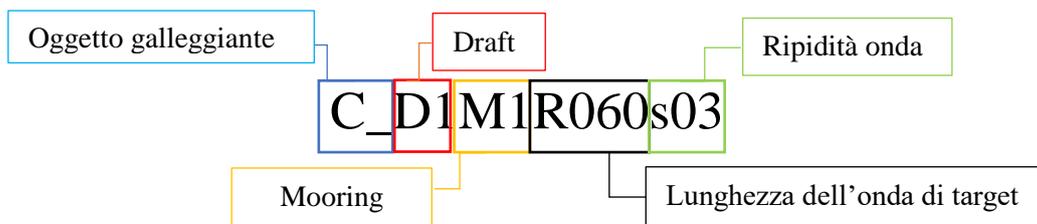
Tabella 3 – Elenco delle caratteristiche delle onde regolari generate.

| Nome onda | Tipologia | $s_{op}$ | $L_0$ (mm) | $H_s$ (mm) | $T_p$ (sec) |
|-----------|-----------|----------|------------|------------|-------------|
| R01       | Regolare  | 0.030    | 600        | 18         | 0.63        |
| R01bis    | Regolare  | 0.040    | 600        | 24         | 0.63        |
| R02       | Regolare  | 0.030    | 700        | 21         | 0.67        |
| R02bis    | Regolare  | 0.039    | 700        | 27         | 0.67        |
| R03       | Regolare  | 0.030    | 800        | 24         | 0.72        |
| R03bis    | Regolare  | 0.038    | 800        | 30         | 0.72        |
| R04       | Regolare  | 0.030    | 900        | 27         | 0.765       |
| R04bis    | Regolare  | 0.037    | 900        | 33         | 0.765       |
| R05       | Regolare  | 0.030    | 1000       | 30         | 0.82        |
| R05bis    | Regolare  | 0.036    | 1000       | 36         | 0.82        |
| R06       | Regolare  | 0.030    | 1100       | 33         | 0.85        |
| R06bis    | Regolare  | 0.035    | 1100       | 39         | 0.85        |
| R07       | Regolare  | 0.030    | 1200       | 36         | 0.9         |
| R07bis    | Regolare  | 0.033    | 1200       | 40         | 0.9         |
| R08       | Regolare  | 0.030    | 1300       | 39         | 0.94        |
| R08bis    | Regolare  | 0.035    | 1300       | 45         | 0.94        |
| R09       | Regolare  | 0.046    | 1300       | 60         | 0.93        |
| R10       | Regolare  | 0.062    | 1300       | 80         | 0.93        |

**Tabella 4 - Elenco delle caratteristiche delle onde irregolari generate.**

| Nome onda | Tipologia  | $s_{op}$ | $L_0$ (mm) | $H_s$ (mm) | $T_p$ (sec) |
|-----------|------------|----------|------------|------------|-------------|
| I01       | Irregolare | 0.030    | 600        | 18         | 0.63        |
| I02       | Irregolare | 0.030    | 800        | 24         | 0.72        |
| I03       | Irregolare | 0.030    | 1000       | 30         | 0.82        |
| I04       | Irregolare | 0.030    | 1200       | 36         | 0.9         |
| I05       | Irregolare | 0.033    | 1200       | 40         | 0.94        |
| I06       | Irregolare | 0.030    | 1300       | 39         | 0.94        |
| I07       | Irregolare | 0.035    | 1300       | 45         | 0.94        |
| I08       | Irregolare | 0.036    | 1000       | 36         | 0.94        |

Per la distinzione e l'identificazione dei test è stato utilizzato un nome ID, di seguito sinteticamente illustrato per un test generico eseguito su cilindro:



Per un test generico eseguito sul box:

**B\_D1M1RL060s03**

Si evidenzia che per onda regolare si usa “R” e per onda irregolare “I”.

Quindi oltre ai dati di progetto (onda di target e ripidità) vengono indicati anche i tipi di ancoraggio (mooring) e l'affondamento (draft) dell'oggetto galleggiante con i quali è possibile classificare le diverse configurazioni dell'oggetto nei vari test.

Vediamo ora come queste caratteristiche vengono indicate nei due oggetti:

- Box

|    |           |
|----|-----------|
| M1 | obliquo   |
| M2 | verticale |
| M3 | catenaria |

|         |      |
|---------|------|
| D0 (mm) | 0    |
| D1 (mm) | 100  |
| D2 (mm) | -100 |

- Cilindro

|    |           |
|----|-----------|
| M1 | obliquo   |
| M3 | catenaria |

|         |      |
|---------|------|
| D1 (mm) | -50  |
| D2 (mm) | -100 |
| D3 (mm) | -35  |

Gli ancoraggi obliqui e verticali sono fatti con cavi in nylon, le catenarie con catene di acciaio.

Il segno negativo dell'affondamento indica di quanto è emerso l'oggetto rispetto al livello zero, impostato in corrispondenza della superficie libera dell'acqua. Si evidenzia che nel test C\_D1M1 l'anello di aggancio dei cavi è stato posto a 11 cm dal fondo e nel test C\_D2M1 è stato posto a 6 cm dal fondo.

Infine sono state riportate le configurazioni degli oggetti relative ad ogni test effettuato:

**Tabella 5 – Elenco delle configurazioni degli oggetti galleggianti.**

| Oggetto  | Tipo di ancoraggio | Affondamento (mm) |
|----------|--------------------|-------------------|
| Box      | obliquo            | 0                 |
| Box      | obliquo            | 0                 |
| Box      | obliquo            | 100               |
| Box      | obliquo            | 100               |
| Box      | verticale          | 0                 |
| Box      | verticale          | 0                 |
| Box      | catenaria          | -100              |
| Cilindro | obliquo            | -50               |
| Cilindro | obliquo            | -50               |
| Cilindro | obliquo            | -100              |
| Cilindro | obliquo            | -100              |
| Cilindro | catenaria          | -35               |

Per il cilindro sono state effettuate inoltre due prove con oscillazione libera - *free decay* - al fine di determinare la frequenza di oscillazione propria dell'oggetto. Sono state nominate "C\_M3\_00" e "C\_M3\_FF", riferite rispettivamente alla posizione di partenza di rilascio dell'oggetto in prossimità del pelo libero e del fondo del canale.

### 3. RISULTATI SPERIMENTALI

Innanzitutto sono stati analizzati i dati di calibrazione delle sonde al fine di valutare l'altezza d'onda significativa, misurata da ogni sonda, necessaria per le successive analisi della dinamica degli oggetti.

#### 3.1 ANALISI DELLE SONDE

Come detto in precedenza (vedi Capitolo 2.2.1) la calibrazione della sonda restituisce il valore della variazione della superficie libera  $\eta$ (Volt) rispetto al livello “zero” fissato.

Labview fornisce un file.lvm di calibrazione costituito da otto colonne di dati: la prima relativa al tempo associato e le altre relative ad ogni sonda (la sensibilità delle sonde è al millesimo di millimetro, mentre quella temporale è al centesimo di secondo, pertanto si avranno cento misure di livello al secondo).

È stata impostata la routine Matlab “calibrazione\_sonde\_floating” al fine di ricavare un file.txt, per ogni giornata di test, contenente i valori di intercetta ( $z_0$ ) e coefficiente angolare ( $m$ ) della retta di regressione lineare delle coppie di valori mm-Volt. Tali valori permetteranno in seguito di poter ricavare la variazione della superficie libera in mm (vedi Figura 14 linea 81):

$$\eta(mm) = m \cdot \eta(V) + z_0$$

Si riporta in seguito uno stralcio dello script:

```
3 - clear all
4 - close all
5
6 - data='201800507';
7 - cc=['k','r','b','g','k','r','b','g','k','r'];
8
9 - n_test=['1','2','3'];%%% test prove di calibrazione
10
11 - dz=[0,-30,-55];%, 60]; %% sonda in generazione (spostamento verticale delle sonde di 30 mm in basso)
12         %%(se si sposta in alto la sonda per la 2° acqu. mettere -30)
13 - dz2=[0,-30,-80];%, 60]; %% tripletta di sonde per la riflessione
14
15 - ni=[1;1;1;1;1;1];
16 - nf=[30000;30000;30000;30000;30000;30000;30000];
17
18 - path_prove=strcat('C:\Users\User\Desktop\TIROCINIO\SONDE\PROVE\Regular\20180507\');
```

Figura 12 – Routine Matlab “calibrazione\_sonde\_floating”.

È stato necessario inserire la data in cui veniva eseguito il test, la cartella da cui prelevare i file.lvm di calibrazione e specificare il numero di prove di calibrazione effettuate. Si evidenzia in questo caso che le prove effettuate erano quattro ma la quarta era ridondante poiché restituiva gli stessi risultati rispetto alla prima.

In seguito, tramite l'utilizzo dello script Matlab "read\_wavegauge", introducendo i dati di calibrazione.txt test day e i dati.lvm relativi ad ogni sonda e ad ogni onda di target (file testo costituito da 8 colonne: una per il tempo e le altre per le sette sonde), è stato possibile passare dal dato in Volt al dato in mm.

```

1 - clear all
2 - clc
3
4 - path_test='C:\Users\User\Desktop\TIROCINIO\SONDE\PROVE\Regular\20180621\C_D3M3R01bis\';
5 - nome_test='Target_Wave_R01.lvm/';
6 - nome_onda='Sonde_R01bis';
7 - %file_test=(num2str(path_test) num2str(nome_test) 'WaveGauge_' num2str(nome_onda) '.lvm');
8
9 - dati=load([(path_test) num2str(nome_onda) '.lvm']);
10
11 - T0=dati(:,1);
12 - % S1_=dati(:,2);
13 - S2_=dati(:,3);
14 - S3_=dati(:,4);
15 - S4_=dati(:,5);
16 - S5_=dati(:,6);
17 - S6_=dati(:,7);
18 - S7_=dati(:,8);

```

Figura 13 - Routine Matlab "read\_wavegauge".

Le sonde analizzate in realtà sono sei, dato che la prima sonda riscontrava errori nella misurazione del livello in fase di generazione si è scelto di trascurarla.

```

78 - C=load('C:\Users\User\Desktop\TIROCINIO\SONDE\PROVE\Regular\20180621\calibrazione.txt');
79
80 - % S1=C(1,1)*S1_+C(1,2);
81 - S2=C(2,1)*S2_+C(2,2);
82 - S3=C(3,1)*S3_+C(3,2);
83 - S4=C(4,1)*S4_+C(4,2);
84 - S5=C(5,1)*S5_+C(5,2);
85 - S6=C(6,1)*S6_+C(6,2);
86 - S7=C(7,1)*S7_+C(7,2);
87
88 - S0=[S2 S3 S4 S5 S6 S7];
89 - ti=62*1000; % segnale tagliato e riscalato nei tempi
90 - tf=195*1000;
91 - S=S0(ti:tf,:);
92 - T=T0(ti:tf,:)-T0(ti-1,:);

```

Figura 14 - Routine Matlab "read\_wavegauge".

Per una migliore visualizzazione, il segnale è stato tagliato e riscalo nei tempi in modo diverso per onde regolari e irregolari. I tempi sono stati moltiplicati per la frequenza di acquisizione del segnale pari a 1000 Hz.

Infine, il segnale acquisito e convertito in mm, è stato elaborato tramite l'analisi di zero-down crossing al fine di ricavare statisticamente l'altezza d'onda significativa pari a 1/3 delle onde più alte. Sono state ricavate dunque le  $H_s$  per ogni sonda e per ogni onda di target (vedi Appendice A. Tabella 16 e Tabella 17).

Dall'analisi si è evidenziato che le altezze d'onda significative  $H_{s,wg}$  misurate sono molto più piccole rispetto alle onde di target (maggiore scostamento si nota per le onde irregolari).

Dall'analisi del segnale, sono state ricavate delle tabelle con i valori di  $H_s$  incidenti per le due triplette di sonde, in riflessione e in trasmissione, e per ogni onda di test (quindi  $H_{s, inshore}$  e  $H_{s, off-shore}$  così indicate). Successivamente dopo aver ricavato il rapporto tra l' $H_s$  incidente e la  $H_{s, target}$ , è stata valutata la media di tutti i rapporti. Tale media assegnata ad ogni grafico definisce, in media, di quanto la  $H_s$  si discosta dai valori di target.

A titolo di esempio si riporta uno dei grafici così ricavati:

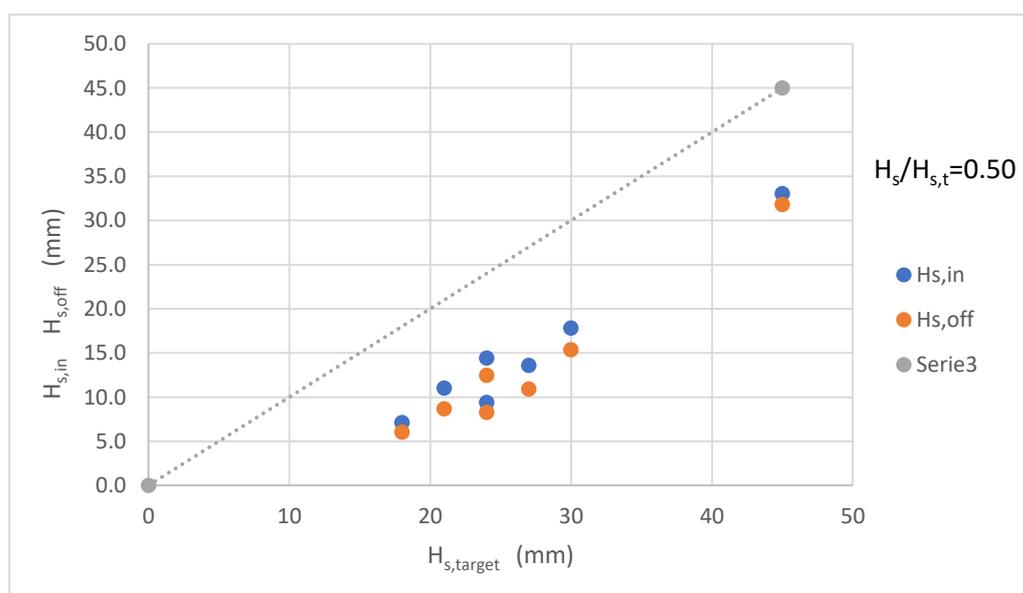


Figura 15 – Confronto tra  $H_s$  in riflessione e trasmissione per il test effettuato sul box il 20180507.

È stato constatato che per ogni test day l'errore risulta sistematico, sia per il box che per il cilindro, con andamenti simili e scostamenti dalla retta a 45° pressoché della stessa entità (come si può osservare in Figura 15). Anche la media del rapporto tra le varie configurazioni risulta simile, infatti il valore medio relativo alle onde regolari è pari a 0.55.

Ulteriore verifica è stata fatta riportando il grafico seguente:

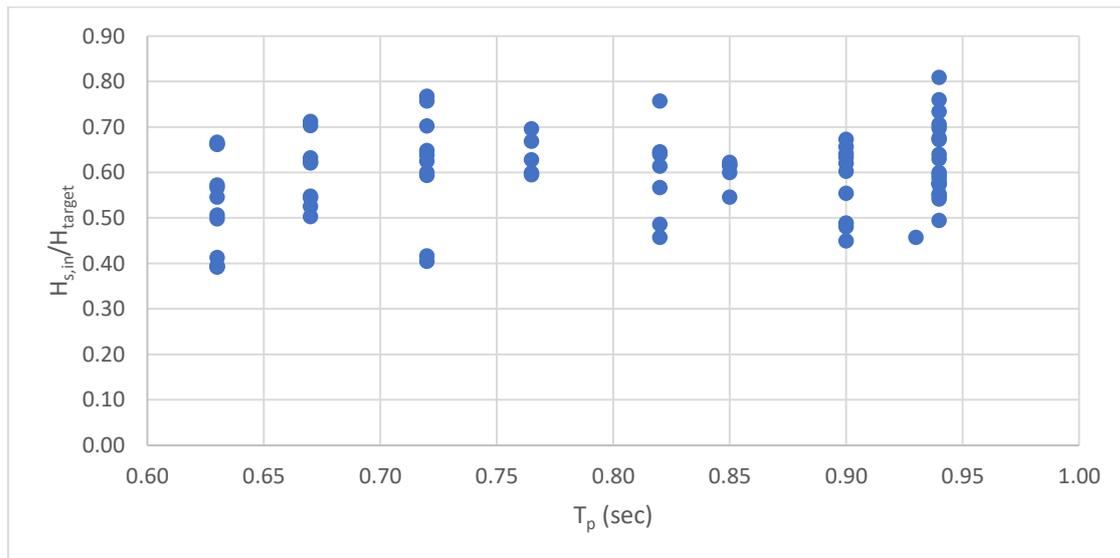


Figura 16 – Variazione dell' $H_s$  in funzione del  $T_p$ .

Si nota in questo caso che all'aumentare del  $T_p$  aumenta anche il rapporto  $H_{s,in}/H_{s,target}$  e quindi si riscontra maggiore corrispondenza tra i due valori. Questo fatto era già stato osservato in altri esperimenti di laboratorio.

### 3.2 ANALISI RIFLESSIONE E TRASMISSIONE

È stato creato ad hoc una routine Matlab denominata “kreflection” utilizzata per la valutazione del coefficiente di riflessione e di trasmissione riferito ad ogni onda.

```
47 - C=load('C:\Users\User\Desktop\TIROCINIO\SONDE\PROVE\Regular\20180621\calibrazione.txt');
48
49 % s1=C(1,1)*s1_+C(1,2);
50 - s2=C(2,1)*s2_+C(2,2);
51 - s3=C(3,1)*s3_+C(3,2);
52 - s4=C(4,1)*s4_+C(4,2);
53 - s5=C(5,1)*s5_+C(5,2);
54 - s6=C(6,1)*s6_+C(6,2);
55 - s7=C(7,1)*s7_+C(7,2);
56
57 - s0=[s2 s3 s4 s5 s6 s7];
58 - ti=round((56.7+5.2/(1.56*Tp^2))*1000);% segnale tagliato e riscalato nei tempi
59 - tf=round(ti+10*Tp*1000);
60 - S=s0(ti:tf,:)-mean(s0(50*1000:60*1000,1));
61 - T=T0(ti:tf,:)-T0(ti-1,:);
62 - mxS=max(max(S));
```

Figura 17 - Routine Matlab “kreflection”.

```
147 %%analisi trasmissione
148 - ti=round((56.7+7.6/(1.56*Tp^2))*1000);% segnale tagliato e riscalato nei tempi
149 - tf=round(ti+10*Tp*1000);
150 - S=s0(ti:tf,:)-mean(s0(50*1000:60*1000,1));
151 - T=T0(ti:tf,:)-T0(ti-1,:);
152
153 - wgit=[4:6];
154 - wx=[0,0.24,0.44];%%posizione assoluta sonde
155 - wgd=[d,d,d];
```

Figura 18 – Routine Matlab “kreflection”.

Per valutare la riflessione dovuta solo all’oggetto galleggiante il segnale è stato tagliato e riscalato nei tempi considerando che nei primi 10 sec a partire dalla generazione dell’onda non si risenta della riflessione del fondo del canale (in cui è presente l’assorbitore). Dato che le sonde misurano un’onda al secondo, la riflessione è valutata per le prime 10 onde. Per entrambe le analisi il tempo iniziale a partire dalla prima sonda (in riflessione) è dato dalla somma tra il tempo in cui ha inizio l’onda in generazione pari 56.7 sec e la celerità dell’onda data da:

$$c = \frac{L}{1.56T_p^2}$$

dove L è la distanza in metri tra la prima sonda della tripletta e il battionde.

Le analisi di riflessione sono state effettuate solo sulle onde regolari. Si evidenzia che alcuni segnali, plottati su Matlab, risultano disturbati. In tali casi (onde R02bis, R03, R03bis, R04) i coefficienti di riflessione  $k_r$  e trasmissione  $k_t$  potrebbero non essere veritieri, per tal motivo si è deciso di non analizzarli in questa trattazione.

In primo luogo è stata analizzata la riflessione, i cui valori sono compresi in un range tra il 15 e il 40%.

A questo punto è stato necessario effettuare alcuni confronti grafici tra le varie configurazioni dell'oggetto galleggiante.

I risultati del box sono riportati in Figura 19, quelli del cilindro in Figura 20.

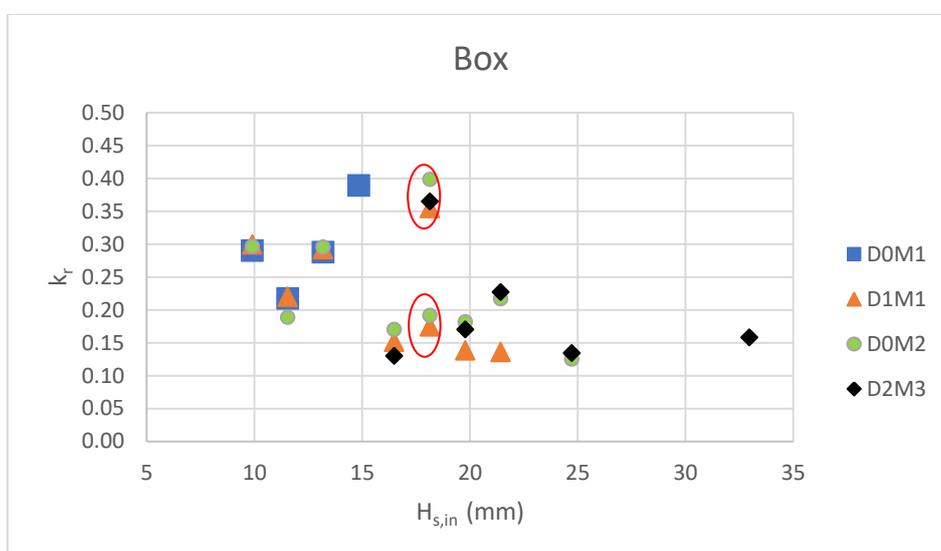


Figura 19 – Analisi riflessione per il box.

Per una migliore comprensione grafica si evidenzia che i dati cerchiati rappresentano valori di  $k_r$  per due attacchi ondosi differenti ma con stessa  $H_{s,target}$ .

Per il box, in generale si evidenzia che  $k_r$  risulta maggiore nel caso emerso rispetto a quello sommerso, come ci si poteva aspettare, con coefficienti di riflessione che variano da 0.13 a 0.36. Per le prime onde si nota che  $k_r$  per il box con D0 è maggiore rispetto agli altri casi, ma comunque i valori sono molto simili.

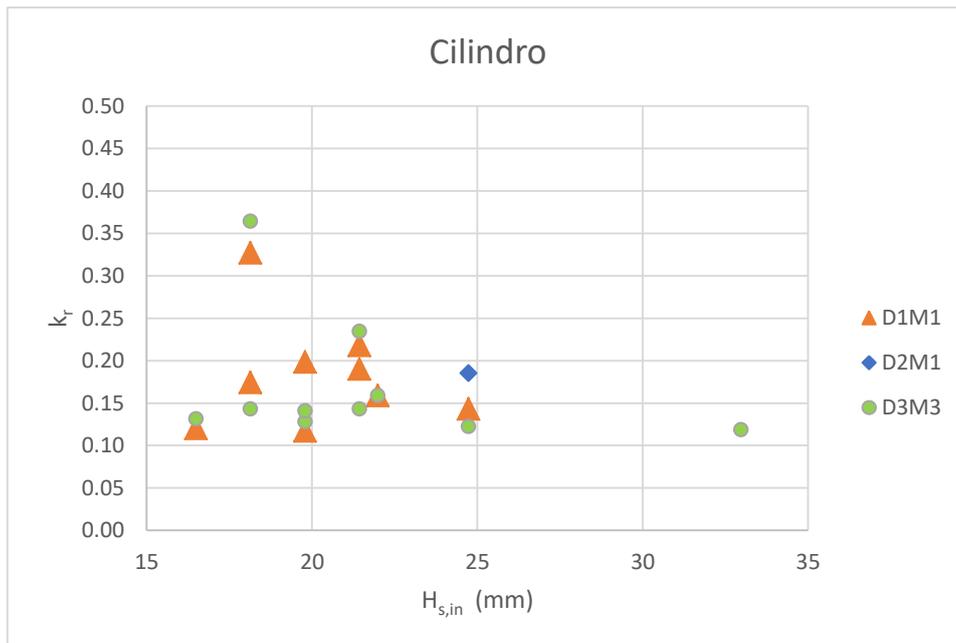
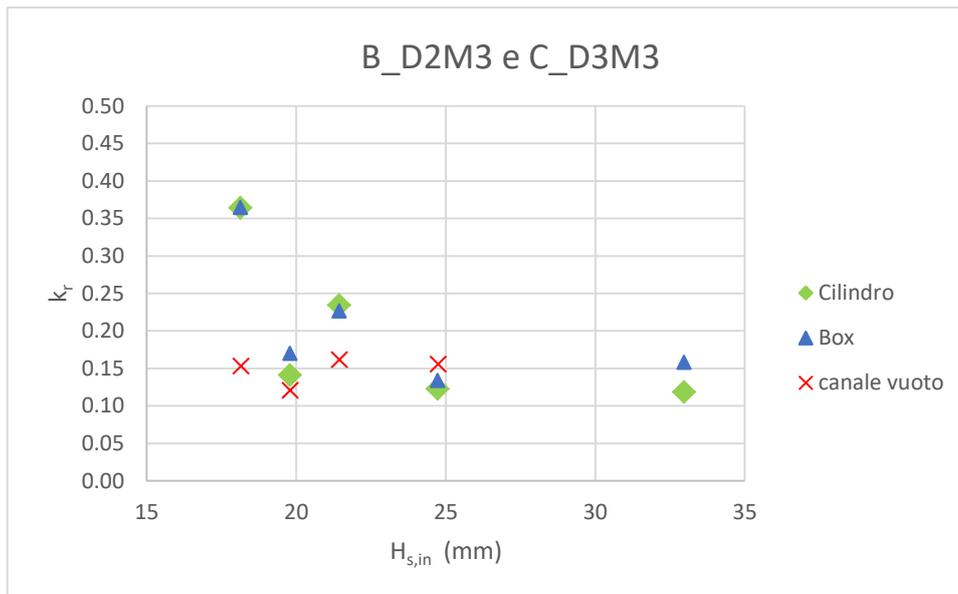


Figura 20 – Analisi di riflessione per il cilindro.

Per il caso del cilindro, in generale si evidenziano dei valori di  $k_r$  maggiori nel D1M1 rispetto al D3M3. A parità di ancoraggio, si nota che  $k_r$  nel D2M1 è maggiore del D1M1. Anche qui i valori sono molto simili tra le tre configurazioni.

Si ricorda che per il cilindro l'affondamento è sempre negativo dunque l'oggetto è emerso.

Di seguito si riporta, invece, il confronto grafico tra due configurazioni simili del box e del cilindro ed inoltre si riportano i coefficienti misurati per un test effettuato in canaletta vuota (senza la presenza di oggetti che ostacolano il moto del fluido).



**Figura 21 – Analisi di riflessione con confronto tra due configurazioni del box e del cilindro emersi e in assenza di oggetto.**

Si evidenzia però che le due configurazioni non sono del tutto uguali, il box emerge di 100 mm e il cilindro di 35 mm. In generale si evidenzia un  $k_r$  del box maggiore come ci si può aspettare (infatti  $k_r = \phi/L$  dove  $\phi$  è la lunghezza della base dell'oggetto nella direzione dell'onda, per cui  $\phi$  è maggiore nel box rispetto al cilindro).

In media  $k_r$  è compreso tra il 10-20% nel caso di canale vuoto, mentre la presenza dell'oggetto galleggiante influisce sulla riflessione prodotta nel canale, evidente nei dati di  $k_r$  nelle tabelle riferite ai grafici successivi (Tabella 6 e Tabella 7), relativi ad una configurazione con cilindro emerso e ad una configurazione con box sommerso.

I dati per il test con canale vuoto sono riportati in Appendice A, in Tabella 18.

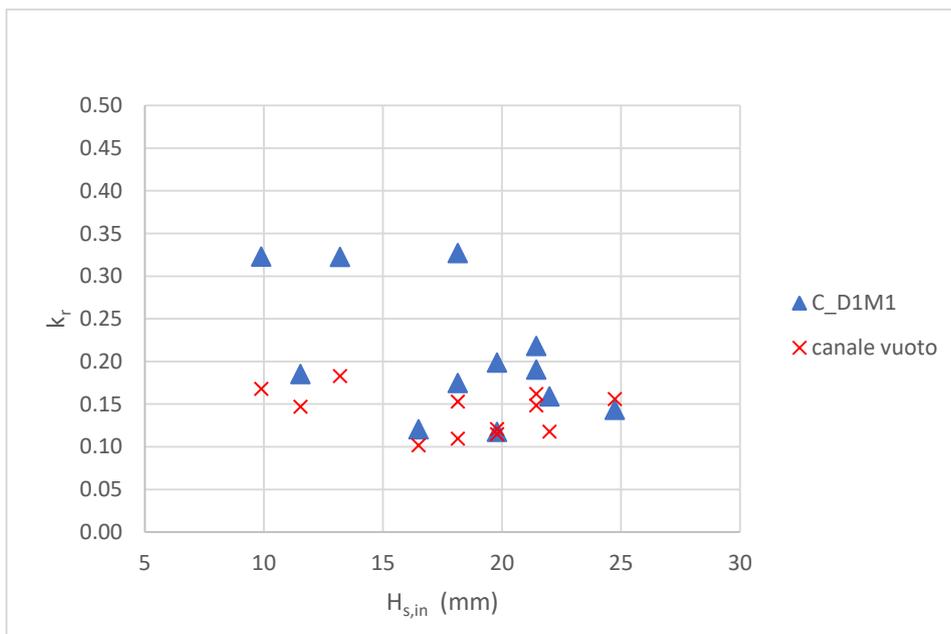


Figura 22 – Analisi di riflessione con confronto tra cilindro emerso e canale vuoto.

Tabella 6 – Elenco coefficienti di riflessione per cilindro emerso e canale vuoto.

|        | $H_{s,t}$<br>(mm) | $H_{s,i}$<br>(mm) | $k_{r,vuoto}$ | $k_{r,cilindro}$ | Differenza    |
|--------|-------------------|-------------------|---------------|------------------|---------------|
| R01    | 18                | 9.9               | 0.1681        | 0.3227           | <b>15.46%</b> |
| R01bis | 24                | 13.2              | 0.1828        | 0.3226           | <b>13.98%</b> |
| R02    | 21                | 11.55             | 0.1468        | 0.1852           | <b>3.84%</b>  |
| R04bis | 33                | 18.15             | 0.1097        | 0.1746           | <b>6.49%</b>  |
| R05    | 30                | 16.5              | 0.1016        | 0.1203           | <b>1.87%</b>  |
| R05bis | 36                | 19.8              | 0.1148        | 0.1173           | <b>0.25%</b>  |
| R06    | 33                | 18.15             | 0.153         | 0.327            | <b>17.40%</b> |
| R06bis | 39                | 21.45             | 0.1486        | 0.1903           | <b>4.17%</b>  |
| R07    | 36                | 19.8              | 0.1209        | 0.1986           | <b>7.77%</b>  |
| R07bis | 40                | 22                | 0.1177        | 0.1591           | <b>4.14%</b>  |
| R08    | 39                | 21.45             | 0.1618        | 0.218            | <b>5.62%</b>  |
| R08bis | 45                | 24.75             | 0.1558        | 0.1434           | <b>1.24%</b>  |

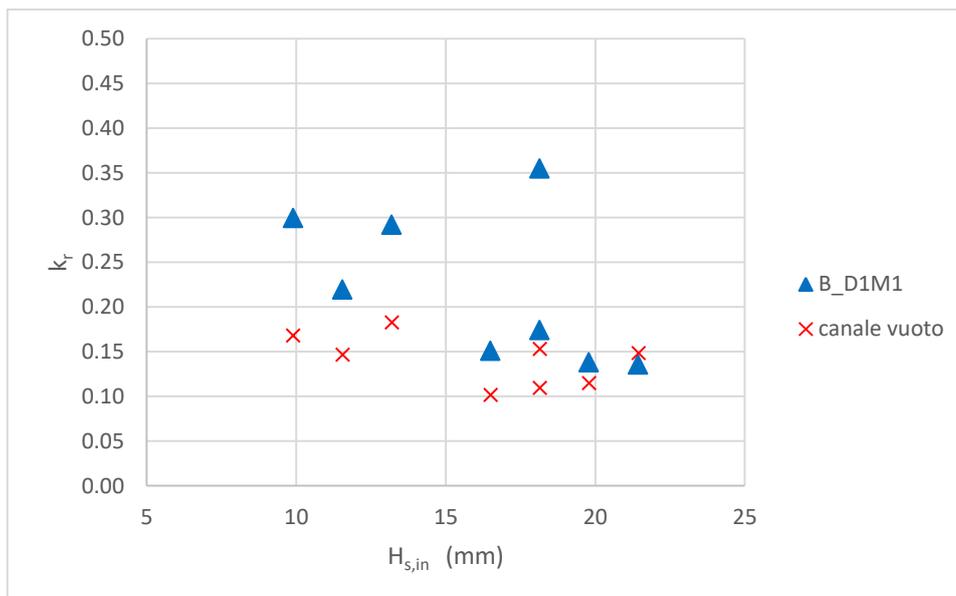


Figura 23 - Analisi di riflessione con confronto tra box sommerso e canale vuoto.

Tabella 7 - Elenco coefficienti di riflessione per box sommerso e canale vuoto.

|        | $H_{s,t}$<br>(mm) | $H_{s,i}$<br>(mm) | $k_{r,vuoto}$ | $k_{r,box}$ | Differenza   |
|--------|-------------------|-------------------|---------------|-------------|--------------|
| R01    | 18                | 9.9               | 0.1681        | 0.2994      | <b>13.1%</b> |
| R01bis | 24                | 13.2              | 0.1828        | 0.2919      | <b>10.9%</b> |
| R02    | 21                | 11.55             | 0.1468        | 0.2195      | <b>7.3%</b>  |
| R04bis | 33                | 18.15             | 0.1097        | 0.1743      | <b>6.5%</b>  |
| R05    | 30                | 16.5              | 0.1016        | 0.1509      | <b>4.9%</b>  |
| R05bis | 36                | 19.8              | 0.1148        | 0.138       | <b>2.3%</b>  |
| R06    | 33                | 18.15             | 0.153         | 0.3548      | <b>20.2%</b> |
| R06bis | 39                | 21.45             | 0.1486        | 0.1355      | <b>1.3%</b>  |

In entrambe le configurazioni la differenza, tra i due coefficienti, risulta maggiore per onde più basse. Si notano, anche in quest'ultimo caso,  $k_r$  maggiori rispetto al canale vuoto ed inoltre poche differenze rispetto al caso emerso.

Per quanto concerne l'analisi di trasmissione si osservano valori del coefficiente tra il 20 e il 40 %. Sono stati ricavati i grafici relativi alle configurazioni dei due oggetti, riportati in Figura 24 e Figura 25.

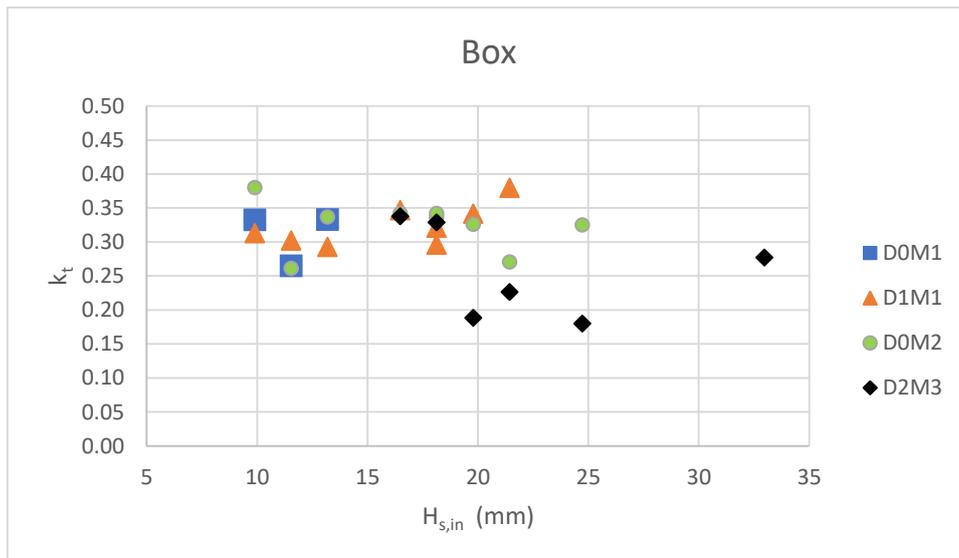


Figura 24 – Analisi di trasmissione per il box.

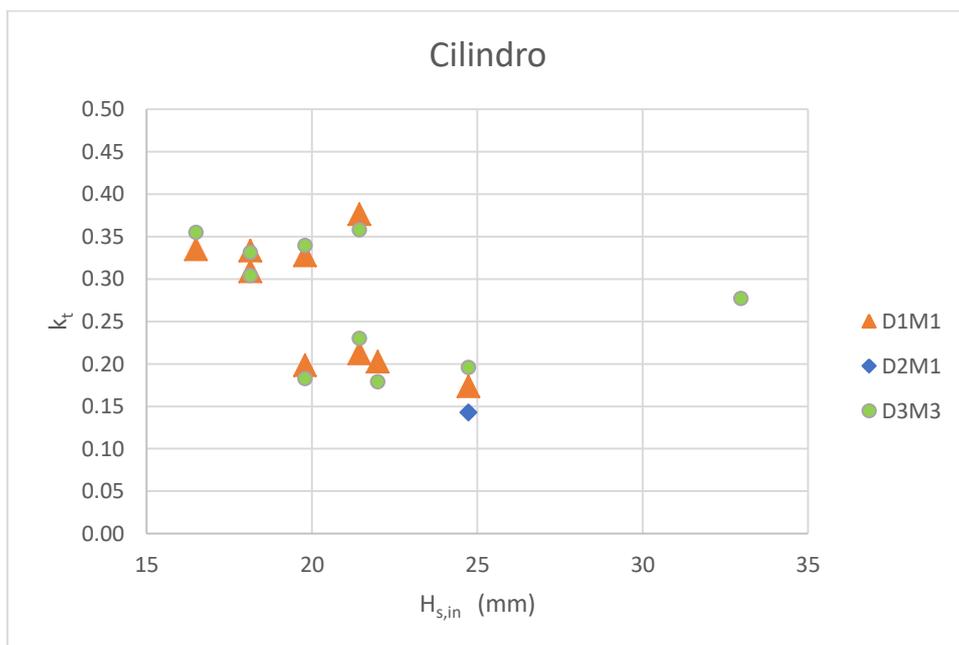


Figura 25 – Analisi di trasmissione per il cilindro.

Si evidenzia una maggiore variabilità dei dati nel box, piuttosto che nel cilindro, e per i test con onde più alte. In questo caso, come ci si può aspettare, la trasmissione è inferiore nel caso di configurazione emersa rispetto a quella sommersa.

### 3.3 ANALISI TRAMITE VIDEO DELLA DINAMICA DEGLI OGGETTI GALLEGGIANTI

Suddetta analisi è stata effettuata soltanto per il cilindro galleggiante, scegliendo due onde di target, R05bis e R08bis, per ogni configurazione, al fine di considerare due onde di entità differente ( $H_s=36$  mm e 45 mm rispettivamente). I video sono stati realizzati con 2 videocamere GoPro, posizionate lateralmente (GP2) e in alto (GP1) al canale, in prossimità dell'oggetto, e configurate in modo da acquisire immagini a 30 Hz con risoluzione Full HD.

#### 3.3.1 EDITING DEI FILMATI GOPRO

Inizialmente è stato effettuato un processo di resampling dei video tramite l'utilizzo del software GoPro Studio, per ridurre l'eccessiva memoria occupata dal formato jpg. Per far ciò si è scelto di passare da 30 fps (frame per second) a 15 fps e, al fine di ottenere un video della stessa lunghezza, nella finestra "video controls" dell'editor, lo *speed* è stato aumentato da 100 a 200. Matlab, in automatico, alla conversione del rate frame raddoppia la lunghezza del video. Non è stato scelto un valore di fotogrammi inferiore a 15 perché avrebbe provocato una notevole perdita di informazioni dell'andamento del pelo libero.

Dalla finestra "Advanced Settings" (in Figura 26) sono state dunque inserite le seguenti impostazioni:

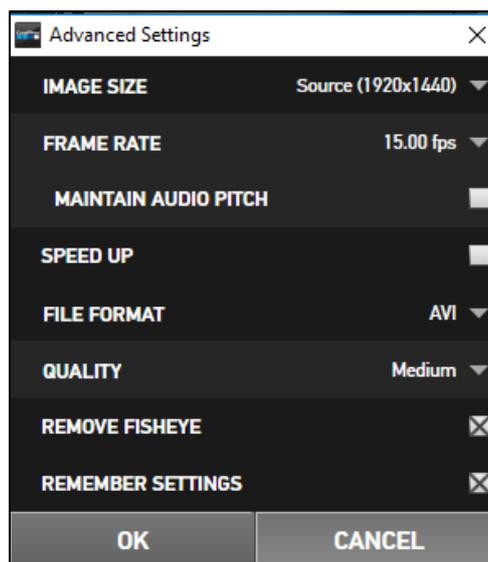


Figura 26 – Interfaccia Advanced Settings del software GoPro Studio.

Il filmato dopo essere stato convertito è stato, quindi, salvato (vedi percorso di salvataggio Figura 27) e caricato successivamente su Matlab per la fase di analisi della dinamica. Viene inoltre salvata un'immagine del cilindro, tratta dal video di riferimento, denominata "TestName\_00" utile per la procedura di cropping delle immagini di calibrazione della camera.

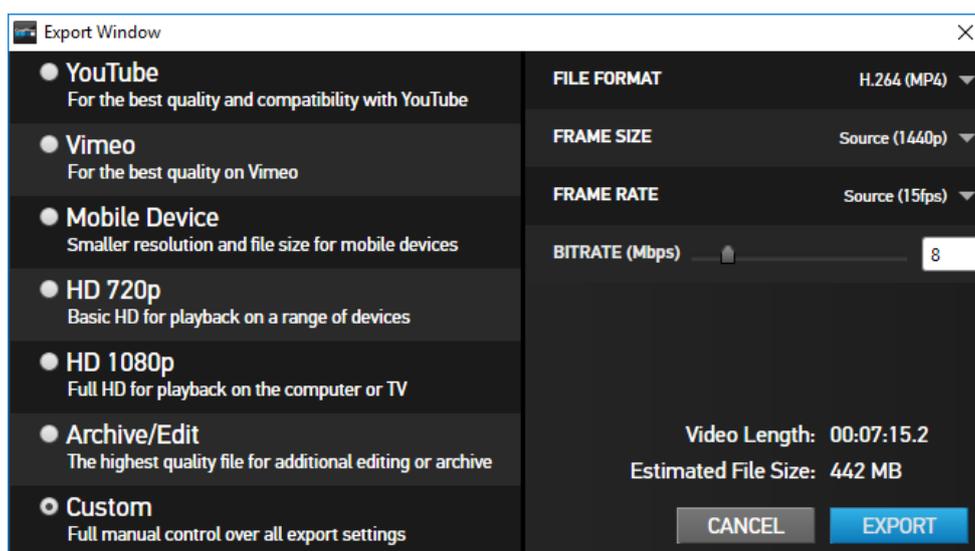


Figura 27 - Schermata di salvataggio del video del software GoPro Studio.

La calibrazione della camera è stata effettuata in fase sperimentale per ogni camera, GP1 e GP2, e per ogni giornata di test eccetto alcuni casi specifici, in cui sono state effettuate più calibrazioni. Per cui ad ogni nuova accensione e spostamento della GoPro è stato effettuato un video di calibrazione (Figura 28) nel quale un operatore ha disposto, davanti alla videocamera ed in posizioni differenti, una scacchiera, di cui è nota la dimensione dei quadrati. È stato necessario allora eseguire un processo di editing di tali filmati estrapolando un certo numero di immagini (minimo tre per ogni calibrazione effettuata), che sono state utilizzate su Matlab per ottenere in maniera automatica i parametri di calibrazione della camera.

I fotogrammi sono stati scelti in base alle differenti posizioni assunte dalla scacchiera, evitando di scegliere posizioni troppo simili tali da diminuire la precisione dei parametri di calibrazione da ricavare.



Figura 28 - Fotogramma calibrazione GP1 (a sinistra), fotogramma calibrazione GP2 (a destra).

Tramite l'utilizzo del tool Matlab denominato "Camera Calibrator Toolbox" è stato possibile verificare l'adeguatezza dei fotogrammi scelti. Per caricare le immagini nel tool è bastato inserire manualmente la dimensione reale del singolo quadrato della scacchiera, pari a 30 mm, e selezionare, dalla finestra "Options", i parametri *skew* e *tangential distortion*. A questo punto il programma individua in modo automatico i nodi della scacchiera (Figura 29), di cui la coppia [0,0] ne indica l'origine degli assi, e facendo girare il codice tramite il comando "calibrate" è possibile vedere se il programma riesce a selezionare le immagini scelte.

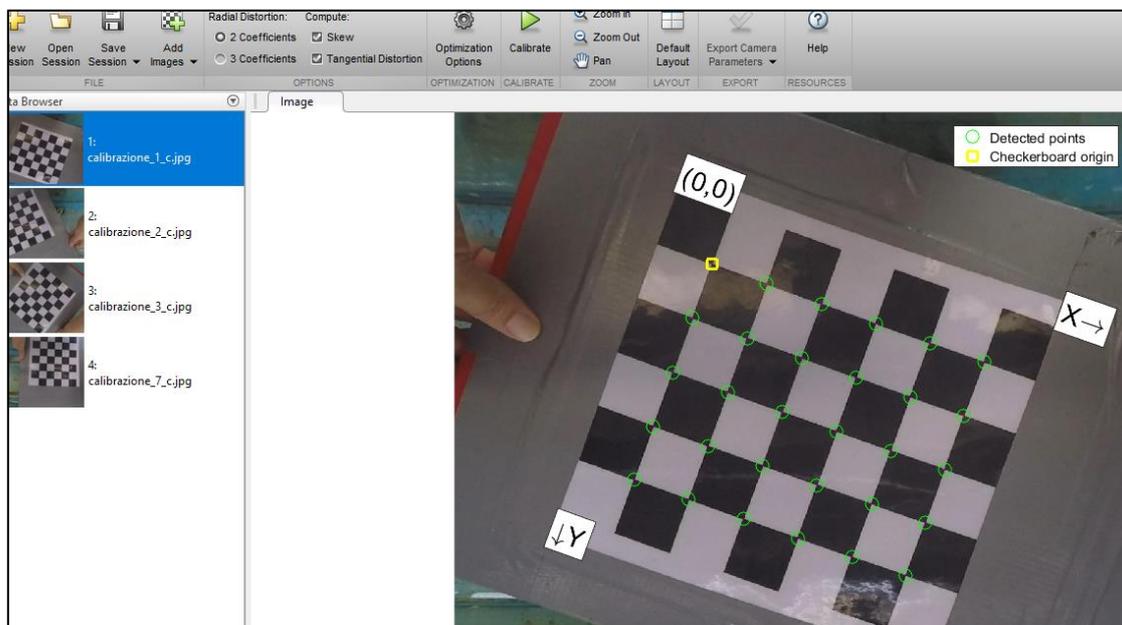


Figura 29 - Individuazione automatica dei vertici della scacchiera (esempio test C\_D2M1R130s04 GP1).

Se le immagini sono adeguate Matlab restituisce due grafici:

- Il grafico *Extrinsic Parameters Visualization* (Figura 30) che permette di visualizzare la collocazione dei pattern a scacchiera rispetto alla GoPro tramite un render 3D che utilizza i parametri esterni della camera calcolati in questa sessione.

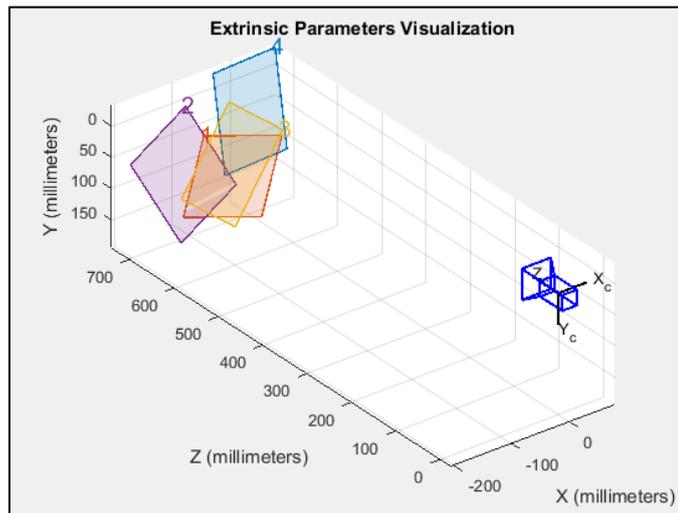


Figura 30 – Render 3D per i parametri esterni di calibrazione (test C\_D2M1R130s04 GP1).

- Il grafico *Mean Reprojection Error* (Figura 31) che rappresenta, per le immagini selezionate, la media dell'errore in termini di pixel. Se tale media è inferiore alla dimensione del pixel (pari a 1) l'errore è accettabile, altrimenti è necessario utilizzare altre immagini rifacendo la procedura fin qui discussa.

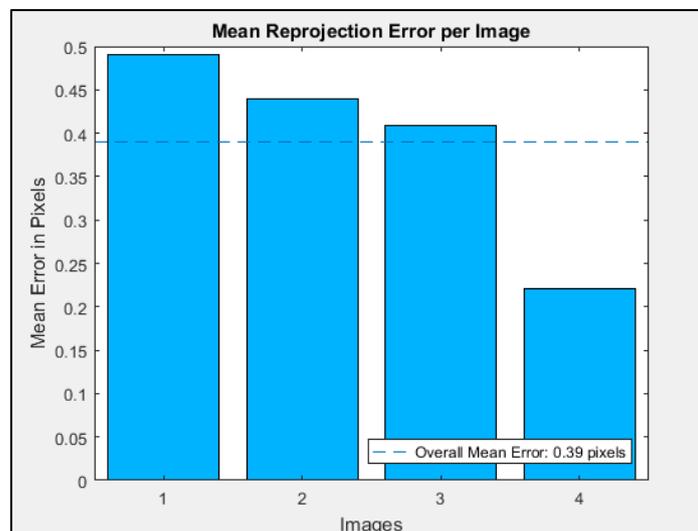


Figura 31 – Individuazione errore di proiezione per ogni immagine (test C\_D2M1R130s04 GP1).

Se le immagini non sono adeguate il programma dà un errore che può essere dovuto al fatto che i fotogrammi scelti hanno un orientamento simile tra loro e non possono essere utilizzati. In alcuni casi però si è visto che ciò dipendesse anche dalle dimensioni grafiche dell'immagine stessa che non permetteva al software di riconoscere e individuare i nodi della scacchiera. Poiché su Matlab è preferibile utilizzare immagini e video del cilindro che non contengano i bordi del canale che, a causa della riflessione attraverso il vetro, potrebbero ostacolare la misura del livello in fase di analisi dinamica, è stato fatto un processo di cropping delle dimensioni dell'immagine.

La procedura di cropping è stata effettuata utilizzando la routine “cropping\_GP\_floating”, e tramite l'immagine “TestName\_00”, salvata in precedenza, sono state scelte le dimensioni dell'immagine per ogni test (vedi linea 11 Figura 32). Nello specifico, sull'immagine di riferimento è stato individuato, in alto a sinistra, il primo vertice del taglio che si è voluto effettuare, le cui coordinate [x,y] definiscono i primi due valori del vettore “icropp”. Successivamente sono state definite la larghezza  $\Delta x$  e l'altezza  $\Delta y$  del ritaglio. Tali dimensioni sono state scelte prendendo in considerazione il movimento del cilindro, l'effetto di deriva e la fase di cresta dell'onda, dunque un certo margine di movimento.

Si riporta uno stralcio dello script di riferimento.

```

4 - test_day='20180621';
5 - test_path='G:\Floating\GOPRO_cilindro\20180621\GP2\C_D3M3R130s04\';
6 - test_name='C_D3M3R130s04';
7
8 - I00= imread([num2str(test_path) num2str(test_name) '_00.jpg']);
9 - figure(1)
10 - imshow(I00)
11 - icropp=[420 220 1280 1080];   %%x0,y0,deltax,deltay

```

Figura 32 – Routine MatLab “cropping\_GP\_floating”.

Dunque utilizzando le procedure appena descritte, sono state scelte le immagini di calibrazione da usare e le rispettive dimensioni del taglio effettuato. Nello specifico, il vettore icropp è stato cambiato di volta in volta per ogni test servendosi dell'immagine del cilindro plottata dallo script “gopro\_calibration\_floating” (descritto in seguito). Nella Tabella 8 si riportano i dati ricavati per ogni test e le calibrazioni utilizzate:

Tabella 8 – Elenco dati per la procedura di calibrazione e di cropping.

| Giorno   | Camera | ID            | Immagini usate | Taglio              | Calibrazione           |
|----------|--------|---------------|----------------|---------------------|------------------------|
| 20180531 | GP1    | C_D1M1R100s04 | 1, 4 e 5       | [400 400 1000 600]  | stessa<br>calibrazione |
|          | GP2    | C_D1M1R100s04 | 1,2 ,3 e 4     | [550 500 690 640]   |                        |
| 20180601 | GP1    | C_D1M1R130s04 | 1, 2 e 3       | [600 350 850 650]   | calibrazione 1         |
|          |        | C_D2M1R100s04 | 1, 2 e 3       | [600 350 850 650]   | calibrazione 1         |
|          | GP2    | C_D1M1R130s04 | 1, 3 e 7       | [600 450 750 750]   | calibrazione 1         |
|          |        | C_D2M1R100s04 | 1, 2 e 3       | [480 400 1000 750]  | calibrazione 2         |
| 20180606 | GP1    | C_D2M1R130s04 | 1, 2, 3 e 7    | [350 200 1100 860]  | stessa<br>calibrazione |
|          | GP2    | C_D2M1R130s04 | 1, 2, 3 e 5    | [350 450 900 820]   |                        |
| 20180621 | GP1    | C_D3M3R100s04 | 1, 2, 3 e 5    | [450 210 1110 910]  | stessa<br>calibrazione |
|          |        | C_D3M3R130s04 | 1, 2, 3 e 5    | [450 210 1110 910]  |                        |
|          |        | C_M3_00       | 1, 2, 3 e 5    | [450 210 1110 910]  |                        |
|          |        | C_M3_FF       | 1, 2, 3 e 5    | [450 210 1110 910]  |                        |
|          | GP2    | C_D3M3R100s04 | 1, 2, 3 e 4    | [700 260 800 1040]  | calibrazione 1         |
|          |        | C_D3M3R130s04 | <b>5 e 7</b>   | [420 220 1280 1080] | calibrazione 2         |
|          |        | C_M3_00       | 1, 2 e 3       | [420 220 1280 1080] | calibrazione 3         |
|          |        | C_M3_FF       | 1, 2 e 3       | [420 220 1280 1080] | calibrazione 3         |

Si evidenzia che nel caso evidenziato in rosso, Matlab non è riuscito a individuare i nodi della scacchiera in più di due immagini, allora, in questo particolare caso, il problema è stato risolto utilizzando le stesse immagini con le dimensioni originali. Nonostante ciò le immagini che il programma ha scelto sono sempre due ma l'errore in termini di pixel risulta accettabile.

A questo punto utilizzando la routine Matlab “gopro\_calibration\_floating” e inserendo il test day, il test path e le immagini di calibrazione scelte è stato possibile ricavare la matrice dei parametri di conversione per ogni giornata di test e per ogni calibrazione della camera, salvata sotto il nome “camParams\_testday”. Tale matrice contiene i vettori di traslazione e i vettori di rotazione della camera, questi ultimi cambiano a seconda della posizione che la GoPro assume ogni giorno.

La routine restituisce anche le caratteristiche intrinseche della camera, come la lunghezza focale in pixel e la distorsione radiale della camera che dipende dal tipo di camera stessa.

### **3.3.2 IDENTIFICAZIONE DEL CILINDRO TRAMITE CLUSTER DI PUNTI**

La routine Matlab “analysis\_GP\_floating” è stata implementata per analizzare la dinamica e quindi l’oscillazione del cilindro all’interno del canale, tramite l’individuazione di un cluster di punti che lo identifichi. Nella routine sono stati inseriti il path\_in, il test\_name e il vettore icropp ricavato in precedenza per ogni test (vedi Tabella 8).

Inoltre, i valori di immagine iniziale e finale del segnale da analizzare (vedi Tabella 9) sono stati definiti considerando l’inizio dell’attacco ondosso che si intende esaminare.

Al fine di analizzare la dinamica dell’oggetto è stato necessario individuare, su Matlab, la posizione del cilindro in ogni fotogramma. Per far ciò sono stati esaminati video eseguiti con la GoPro laterale dato che permettono di poter analizzare sia i movimenti orizzontali che verticali del cilindro. I video della GP1 permettono invece di studiare solo lo spostamento orizzontale.

È stata utilizzata l’immagine del test ridimensionata e, come in fase di cropping, al fine di considerare solo la parte sommersa dell’oggetto sono state scelte le coordinate x e y, qui definite con le variabili  $ix_i$ ,  $ix_e$ ,  $iy_i$ ,  $iy_e$ . A questo punto è stata definita una matrice [a,b] (si evidenzia che in questo caso ed in altri le coordinate x e y sono invertite), che rappresenta il numero di pixel che ricadono all’interno del range prestabilito. Per poter quindi individuare la posizione dei pixel del cilindro, la matrice RGB dell’immagine a colori è stata rappresentata a scala di grigi; quindi tramite l’ausilio del puntatore sull’immagine, è stato individuato l’index dei pixel che ricadono all’interno del cilindro, definito con la variabile “ipx”.

La routine implementata in Matlab individua una nuvola di punti in corrispondenza del cilindro e ne ricava la posizione del baricentro a partire dalla mediana del cluster (che è prossimo al centro di carena dell’oggetto in caso di ancoraggio M1 ed M2).

Di seguito si riportano a titolo di esempio alcuni fotogrammi con il cluster individuato, in Figura 33.

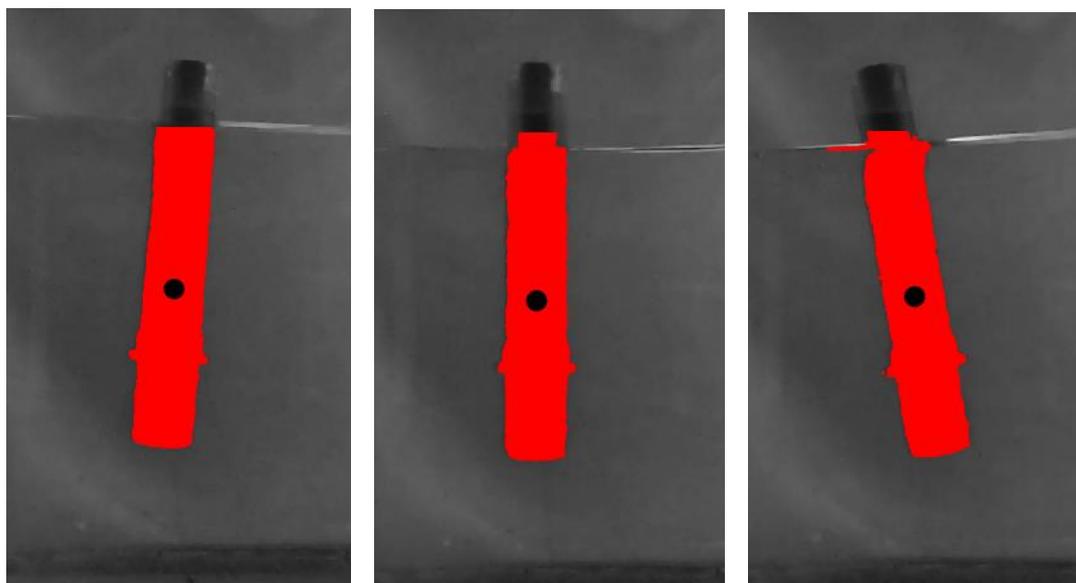


Figura 33 – Fotogrammi del test C\_D2M1R100s04 rappresentanti la nuvola di punti (in rosso) e il baricentro (in nero).

Si evidenzia che è stato deciso di non considerare la parte emersa del cilindro per diversi motivi: la calibrazione della camera è stata effettuata con immagini sott'acqua, la riflessione della superficie libera in alcuni casi non permette di individuare in modo preciso la forma del cilindro e si ha un effetto di distorsione del cluster di certo rilevante sulla misura del baricentro (vedi Figura 33 immagine a destra).

A questo punto per vedere la variabilità nel tempo del cluster sono stati plottati i diversi fotogrammi impostandone il numero da analizzare (con  $\text{fps}=15$ ), tramite la variabile “*iframe*”. Qui si è deciso di considerare l'attacco ondosso e scegliere un range che comprendesse gli ultimi fotogrammi del segnale considerato.

Dalla Figura 33 (immagine al centro) si nota come in alcuni casi in fase di cavo il cluster individui anche una parte del cilindro emerso, rientrando sempre all'interno delle dimensioni di taglio prestabilite per l'individuazione dello stesso. Al fine di eliminare tali punti è stata individuata la superficie libera nel canale definendo i corrispettivi indici (*ipx1*, *ixi1*, *ixe1*, *iyi1*, *iyel*) ed effettuando un'interpolazione lineare, tra i punti individuati, tramite il comando *fillmissing*. Solo nel caso del test C\_D2M1R100s04 del 2018/06/01 è stata scelta un'interpolazione di tipo *next* a causa della difficile individuazione della superficie libera reale. Per tracciare la linea sono

stati presi, a differenza dei casi, i primi o gli ultimi punti della nuova nuvola inserendo 'first' o 'last' nel comando *find*.

A questo punto è stato impostato un procedimento che permette in automatico di escludere i punti del cluster al di sopra della linea interpolante, così da ridurre l'errore sull'individuazione del baricentro del cluster (vedi Figura 35).

Inoltre al fine di eliminare i punti al di fuori del cluster, che influiscono negativamente sulla posizione del baricentro, è stata effettuata una procedura che permette di escludere nel cluster stesso quei punti che non sono consequenziali e quindi contrassegnati con NaN.

```
131 - for l=1:hy;%size(fs0,2)
132 -     iya=find(coor_points(:,2)==iyi+1-1);
133 -     if isempty(iya)==0;[ixa]=find(diff(coor_points(iya,1))>10);%%>10 da variare eventualm
134 -     if isempty(ixa)==0;
135 -         % disp frame
136 -         if length(iya(ixa:end))<length(iya(1:ixa));
137 -             coor_points(iya(ixa:end),:)=NaN;
138 -         else
139 -             coor_points(iya(1:ixa),:)=NaN;
140 -         end
141 -     end
142 - end
143 % pause
144 - end
```

Figura 34 – Routine Matlab "analysis\_GP\_floating".

Ulteriore problema che è stato riscontrato riguarda il posizionamento della GoPro laterale, troppo in basso rispetto alla visuale dell'oggetto. Questo fa sì che la nuvola di punti non solo individui il cilindro sommerso ma anche la parte emersa riflessa, però, sulla lama d'acqua della superficie libera. Perciò in alcuni casi, per esempio in fase di cresta dell'onda, tale riflessione può avvenire in direzioni diverse rispetto alla reale posizione del cilindro. Si ha dunque una sorta di effetto di distorsione del cluster (simile al caso di Figura 33 immagine a destra). Per cui l'individuazione del pelo libero risulta superflua in questo caso poiché essa non corrisponde con la reale posizione a contatto con l'oggetto. Questo fenomeno risulta più significativo nel caso della catenaria. Perciò l'unico modo per risolvere il problema è stato considerare una dimensione di taglio più ristretta tale da evidenziare il cluster solo per la parte centrale del cilindro, sia per la R05bis che per la R08bis del 2018/06/21 (vedi Tabella 9).

Si riportano a titolo di esempio alcuni fotogrammi con il cluster e la superficie libera individuata in Figura 35.

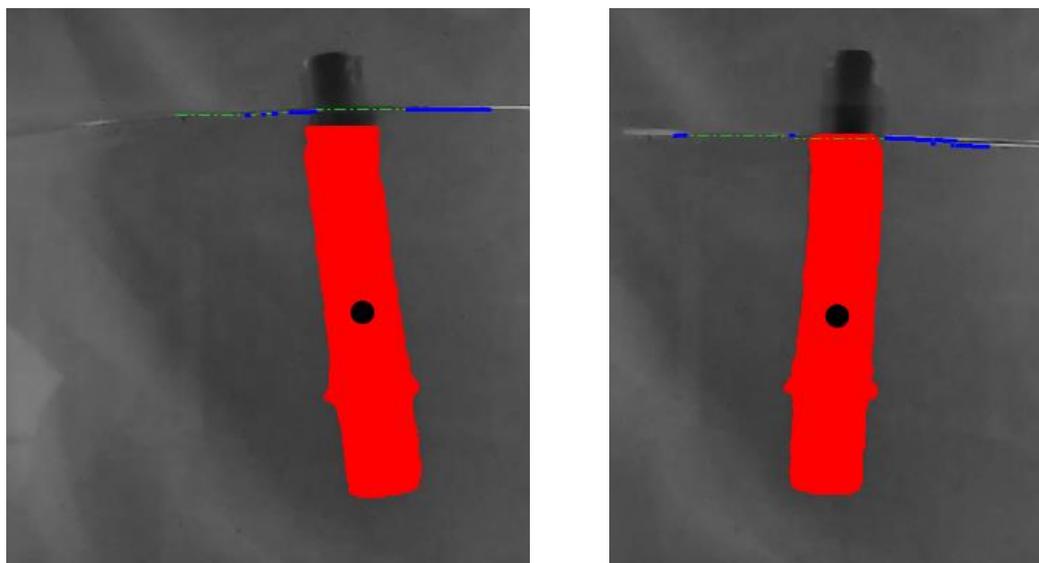


Figura 35 - Frame del test C\_D2M1R100s04 del 2018/06/01 in fase di cresta (a destra) e di cavo (a sinistra), in cui la retta (in verde) rappresenta l'interpolazione effettuata per i punti trovati (in blu).

Per quanto riguarda invece le prove in *free decay*, si individua un cluster non uniforme e per ovviare a questo problema è stata creata una routine denominata “gopro\_GP\_floating\_manual” che permette, tramite il comando *ginput*, di selezionare manualmente i punti sul cilindro. Si è scelto di individuare tre punti significativi in corrispondenza dell'anello del cilindro. Tali punti sono stati contrassegnati con precisione nella stessa posizione per ogni frame. I parametri da inserire su Matlab sono riportati in Tabella 9 e Tabella 10.

Dunque si riportano in tabella le variabili di ogni test che vanno inserite nella routine per effettuare le suddette analisi:

Tabella 9 - Matrice delle caratteristiche inserite, valide per ogni test e per la camera GP2.

| test_day | test_name     | ipx | iyi | iye | ixi | ixe | iframe                  | frame_ini | frame_fin |
|----------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------------------------|-----------|-----------|
| 20180531 | C_D1M1R100s04 | 43  | 80  | 530 | 250 | 500 | [58*fps:1:59*fps]       | 40        | 60        |
| 20180601 | C_D1M1R130s04 | 45  | 90  | 580 | 200 | 460 | [78*fps:1:79*fps]       | 50        | 80        |
|          | C_D2M1R100s04 | 50  | 150 | 580 | 380 | 590 | [78*fps:1:79*fps]       | 50        | 80        |
| 20180606 | C_D2M1R130s04 | 40  | 150 | 570 | 480 | 730 | [58*fps:1:59*fps]       | 45        | 60        |
| 20180621 | C_D3M3R100s04 | 38  | 230 | 525 | 250 | 580 | [38*fps:1:39*fps]       | 30        | 40        |
|          | C_D3M3R130s04 | 35  | 280 | 510 | 400 | 980 | [78*fps:1:79*fps]       | 50        | 80        |
|          | C_M3_00       | 30  | 210 | 970 | 510 | 700 | [frame_ini:5:frame_fin] | 29        | 34        |
|          | C_M3_FF       | 30  | 210 | 970 | 510 | 700 | [frame_ini:5:frame_fin] | 1         | 11        |

Tabella 10 - Matrice delle caratteristiche inserite, valide per ogni test e per la camera GP2

| test_day | test_name     | ipx1 | iyi1 | iyel | ixi1 | ixe1 |
|----------|---------------|------|------|------|------|------|
| 20180531 | C_D1M1R100s04 | 65   | 50   | 140  | 200  | 600  |
| 20180601 | C_D1M1R130s04 | 65   | 90   | 150  | 150  | 630  |
|          | C_D2M1R100s04 | 99   | 120  | 190  | 300  | 630  |
| 20180606 | C_D2M1R130s04 | 70   | 110  | 175  | 450  | 800  |
| 20180621 | C_D3M3R100s04 | 90   | 30   | 140  | 200  | 600  |
|          | C_D3M3R130s04 | 190  | 30   | 180  | 200  | 980  |

### 3.3.3 RISULTATI SPERIMENTALI DELLA DINAMICA DEL CILINDRO GALLEGGIANTE

Infine è stato possibile procedere all'analisi vera e propria dei video sperimentali con lo scopo di studiare i due movimenti principali a cui è soggetto il cilindro sotto un carico ondoso regolare, heave e surge.

Si evidenzia che la struttura ha 6 gradi di libertà, 3 rotazioni e 3 traslazioni, come schematizzato in Figura 36. Le traslazioni sono surge, sway e heave rispettivamente lungo gli assi x, y e z; le rotazioni sono roll, pitch e yaw rispettivamente attorno agli assi x, y e z.

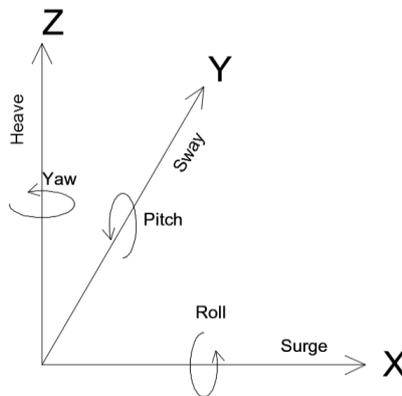


Figura 36 - Gradi di libertà della struttura galleggiante.

Sono stati quindi ricavati alcuni grafici significativi per l'analisi della dinamica dell'oggetto. Il primo riguarda la posizione del baricentro tra i diversi fotogrammi, rappresentato in mm-mm. Si ricorda che la conversione da pixel a mm è stata effettuata tramite l'utilizzo della matrice cameraParams.mat. I grafici che vengono riportati sono riferiti all'attacco ondoso di maggiore entità e ai soli due casi

C\_D2M1R130s04 (Figura 37) e C\_D3M3R130s04 (Figura 38) per cui la differenza di ancoraggio (obliquo e catenaria) ci permette di constatare le dinamiche di movimento verificatesi durante il test.

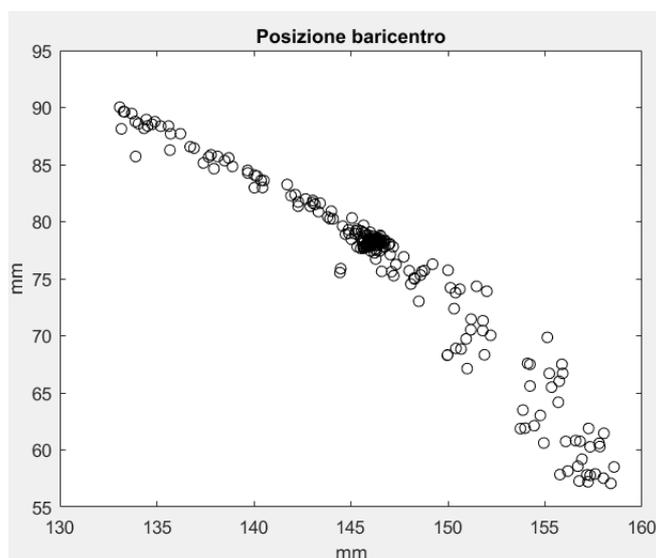


Figura 37 - Posizione baricentro per il test C\_D2M1R130s04.

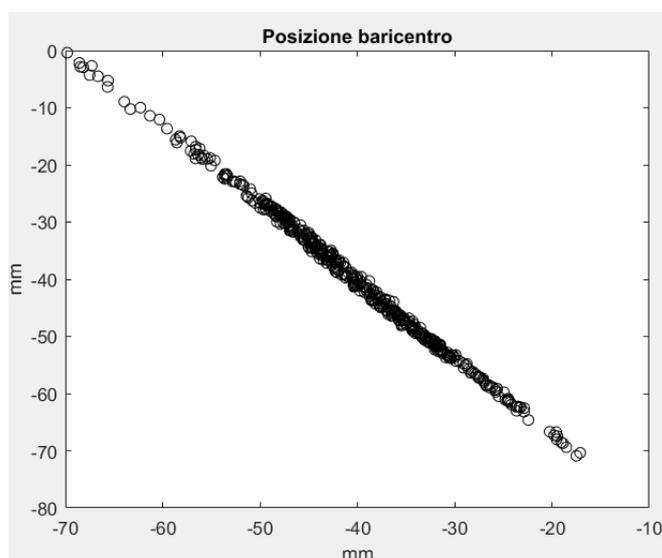
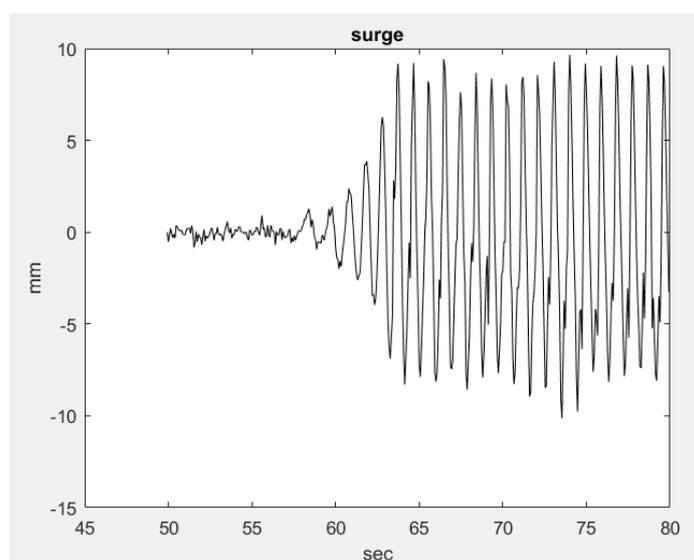


Figura 38 - Posizione baricentro per il test C\_D3M3R130s04.

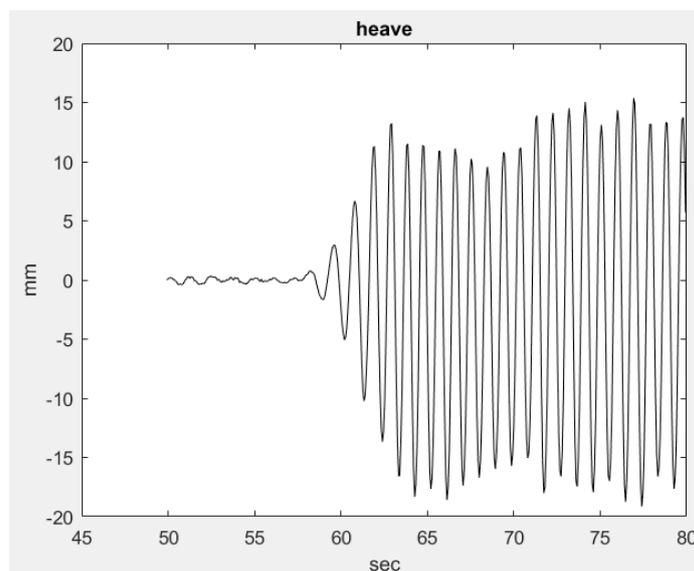
Si nota la presenza di una traiettoria ellittico-lineare del baricentro, tra lo spostamento orizzontale e verticale, dovuta proprio all'oscillazione dell'oggetto. Nel test con catenaria si evidenzia che quando il movimento orizzontale è prevalente, il movimento verticale risulta poco accentuato e viceversa. Anche nel caso con ancoraggio obliquo si ha lo stesso risultato ma a causa della tensione esercitata dai

cavi l'entità dello spostamento è maggiore. Si ricorda comunque che in quest'ultimo caso evidenziato il cilindro emerge di 100 mm rispetto ai 35 mm del caso con catenaria. Inoltre sempre a causa della tensione esercitata dai cavi la traiettoria del baricentro, per spostamenti orizzontali di maggiore entità, non segue più un andamento lineare.

Infine si riportano i grafici dell'oscillazione surge (in Figura 39) e heave (in Figura 40) dell'oggetto per una prima parte del segnale analizzata. I grafici riportati sono relativi ai due casi significativi prima menzionati ed anche al test C\_D1M1R130s04 che ci permette di fare ulteriori considerazioni significative.



**Figura 39 - Analisi del surge del test C\_D1M1R130s04.**



**Figura 40 - Analisi del heave del test C\_D1M1R130s04.**

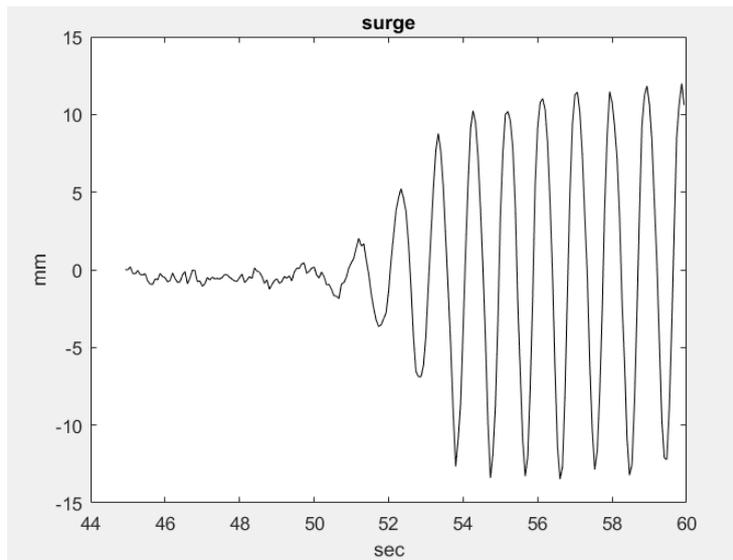


Figura 41 - Analisi del surge del test C\_D2M1R130s04.

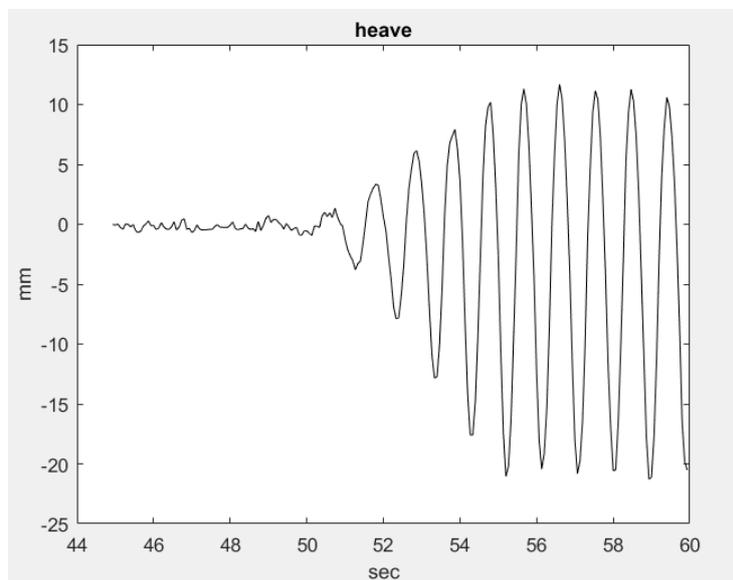


Figura 42 – Analisi del heave del test C\_D2M1R130s04.

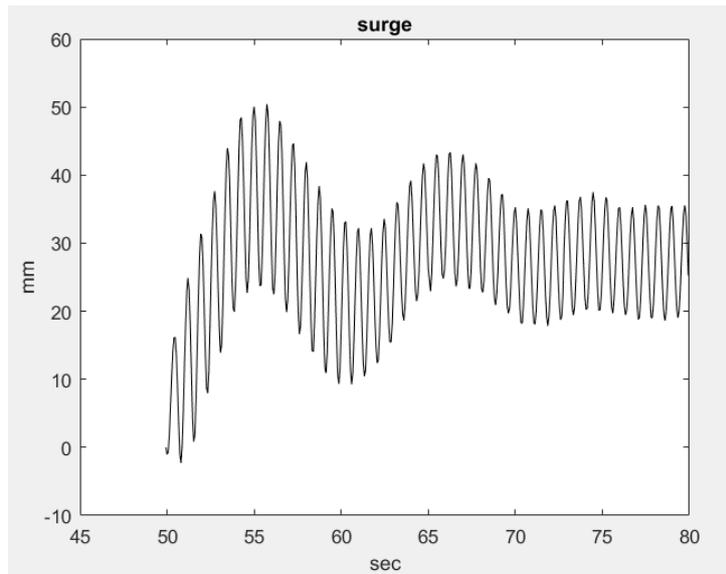


Figura 43 - Analisi surge del test C\_D3M3R130s04.

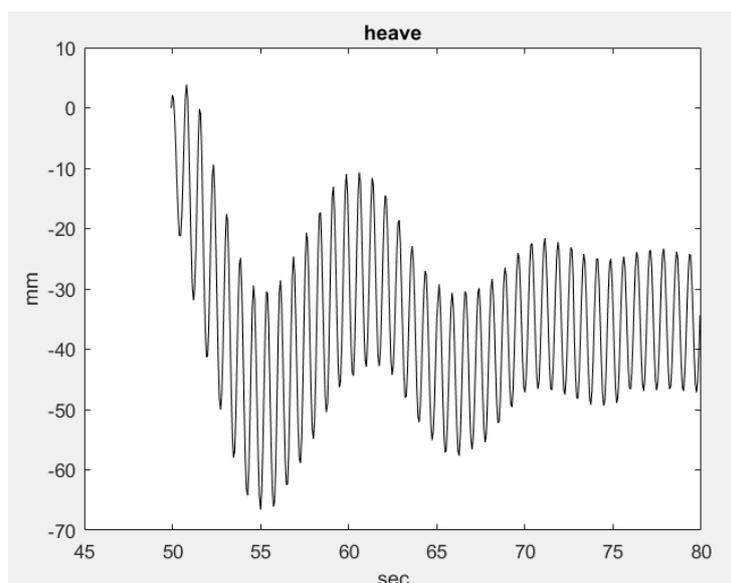


Figura 44 - Analisi heave del test C\_D3M3R130s04.

Dal grafico del surge del test C\_D1M1R130s04 (vedi Figura 39) è possibile constatare la presenza di alcuni spike in corrispondenza dei picchi di movimento, questa anomalia può essere dovuta al fatto che gli ancoraggi obliqui stratonano il cilindro. Infatti da un'analisi visiva dei video si nota un'oscillazione del cilindro macchinosa e poco fluida, differentemente da quanto succede con la catenaria. Nel caso in esame dell'onda R08bis il fenomeno è più accentuato. In un possibile studio successivo si potrebbe eseguire un'analisi spettrale per osservare meglio la presenza di tali spike.

Anche il test C\_D2M1R130s04 ha cavi obliqui ma non si riscontra la presenza di spike, probabilmente perché essendo il cilindro maggiormente emerso la struttura nel complesso risulta più stabile. In tal modo i cavi dovrebbero esercitare una tensione sull'oggetto ma non strattolarlo con forza.

Per quanto riguarda invece il caso della catenaria, l'oscillazione, all'inizio dell'attacco ondosu, è molto accentuata proprio perché le catene (più lente rispetto ai cavi) permettono una più ampia mobilità dell'oggetto. Tale oscillazione a più bassa frequenza rispetto a quella dell'onda decade nel tempo fino a stabilizzarsi (dopo 20 sec). Ora, in realtà, osservando il video del test si nota un movimento confuso del cilindro che tende ad oscillare anche in altre direzioni. In tal caso sarebbe opportuno analizzare anche il pitch (vedi Figura 36), ma in questo studio ci si è focalizzati solo sull'analisi del surge e dell'heave. Comunque tale oscillazione inaspettata può essere dovuta alla non linearità dell'onda nel canale.

Si evidenzia inoltre che nel grafico del surge il segnale, e quindi la posizione del baricentro, alla fine dell'evento, non ritorna alla posizione iniziale a causa dell'effetto di deriva causato dalla catenaria.

Per effettuare un'ulteriore analisi sulla dinamica dell'oggetto galleggiante è stato calcolato il parametro RAO (Response Amplitude Operator) che è in grado di fornire le prime informazioni sull'ampiezza di oscillazione dell'oggetto nel tempo in base alle diverse frequenze delle onde incidenti. Esso è valutato come rapporto tra il maggiore spostamento che si può avere in heave o in surge e l'altezza d'onda incidente.

**Tabella 11 - Parametro RAO per ogni test effettuato.**

|                        | $H_{s,in}$ (mm) | surge (mm) |       | RAO         | heave (mm) |       | RAO         |
|------------------------|-----------------|------------|-------|-------------|------------|-------|-------------|
|                        |                 | min        | max   |             | min        | max   |             |
| 20180601 C_D1M1R130s04 | 24.7            | -10.14     | 9.65  | <b>0.56</b> | -19.15     | 15.38 | <b>1.06</b> |
| 20180601 C_D2M1R100s04 | 18.1            | -2.12      | 7.83  | <b>0.43</b> | -7.84      | 8.34  | <b>0.46</b> |
| 20180606 C_D2M1R130s04 | 24.7            | -13.47     | 11.99 | <b>0.55</b> | -21.28     | 11.69 | <b>0.86</b> |
| 20180621 C_D3M3R100s04 | 18.1            | -21.07     | 1.45  | <b>1.16</b> | -1.02      | 28.20 | <b>1.56</b> |
| 20180621 C_D3M3R130s04 | 24.7            | -2.3       | 50.42 | <b>2.04</b> | -66.60     | 3.91  | <b>2.70</b> |

Si evidenzia che lo spostamento è preso rispetto alla posizione di partenza dell'oggetto e può essere riferito ad una delle due direzioni in cui si muove (da qui il segno negativo di alcuni spostamenti). Il RAO è stato valutato in valore assoluto per il massimo spostamento tra quelli visti (massimi e minimi).

Mettendo a confronto i due casi con onda regolare R130s04 e cavi obliqui si evidenzia che l'ampiezza di oscillazione risulta leggermente più elevata nel caso con affondamento maggiore (C\_D1M1R130s04). Questo fatto ricalca quanto affermato in precedenza sulla maggiore stabilità del cilindro nel test C\_D2M1R130s04. Una netta differenza si nota invece nel caso della catenaria in cui l'oscillazione sia in heave che in surge risulta molto accentuata per entrambe le onde R100s04 ed R130s04. In questo caso l'oscillazione in heave è maggiore rispetto al surge.

Infine è stato analizzato il caso del free decay. Sono stati riportati in Figura 45 e Figura 46 i grafici relativi al test C\_M3\_00, con rilascio dell'oggetto in corrispondenza del pelo libero, e al test C\_M3\_FF, con rilascio in corrispondenza del fondo del canale.

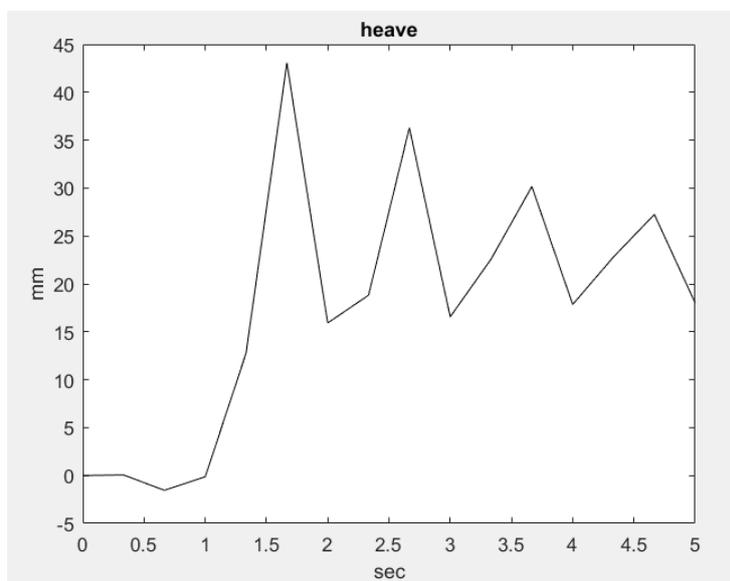


Figura 45 - Analisi heave del test C\_M3\_00 del 20180621.

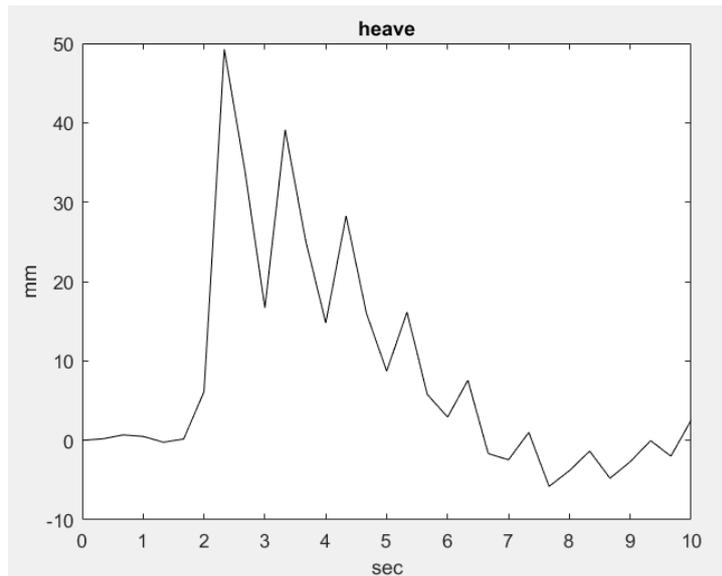


Figura 46 - Analisi heave del test C\_M3\_FF del 20180621.

Naturalmente quello che ci interessa per analizzare la frequenza di oscillazione propria del cilindro è il movimento lungo la verticale. Da una prima analisi dell'heave si evidenzia come il cilindro risponda alla spinta di galleggiamento. Nel caso di partenza dal fondo l'oscillazione è più repentina e pronunciata.

## 4. ANALISI DI FATTIBILITÀ DI WEC A SALINA

La seconda parte della presente tesi è stata incentrata invece sullo studio di fattibilità di convertitori di energia da moto ondoso nell'isola di Salina, appartenente all'arcipelago delle Eolie in Sicilia. È stato fatto un inquadramento generale dell'iniziativa "Salina Isola Sostenibile" e del sito in esame, ed infine è stata effettuata l'analisi di producibilità per i WEC analizzati per un'eventuale installazione vicino all'isola.

### 4.1 PROGETTO "Clean Energy for EU Islands": SALINA ISOLA SOSTENIBILE

Nel Maggio 2017, a Malta la Commissione Europea e 14 paesi dell'UE (Croazia, Cipro, Danimarca, Estonia, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Irlanda, Italia, Malta, Portogallo, Spagna e Svezia) hanno firmato una Dichiarazione politica per la transizione verso l'energia pulita delle isole minori, nell'ambito dell'iniziativa "*Clean Energy for EU Islands*"<sup>[2]</sup>. Tale iniziativa comporterà:

- una riduzione dei costi energetici e aumento della produzione di energia rinnovabile, costruzione di impianti di stoccaggio dell'energia e sistemi di risposta alla domanda, utilizzando le ultime tecnologie;
- una migliore sicurezza energetica per le isole che sarà meno dipendente dalle importazioni;
- migliore qualità dell'aria, minori emissioni di gas serra e minore impatto sugli ambienti naturali delle isole;
- la creazione di nuovi posti di lavoro e opportunità commerciali, aumentando l'autosufficienza economica delle isole.

Per facilitare la transizione verso l'energia pulita, nel 2018 la Commissione ha lanciato il programma "*Clean Energy for EU Islands Secretariat*", che offre sostegno e assistenza per la preparazione dei progetti alle comunità di isole europee<sup>[2]</sup>.

L'obiettivo è quello di aiutare il maggior numero possibile di isole europee a intraprendere e far progredire la transizione verso l'energia pulita in modo da includere l'intera isola e le sue parti interessate. Sulla base dell'esperienza maturata con processi di transizione di successo, la chiave del successo è coinvolgere tutti i

livelli di governance delle isole -cittadini, comuni, imprese locali, università e scuole- e le parti interessate del continente e portarli a bordo per sostenere attivamente e formare la loro transizione<sup>[3]</sup>.

Al programma aderiscono l'isola di Salina appartenente all'arcipelago delle Eolie in Sicilia, l'isola di Cres-Lošinj (Croazia), le Isole Aran (Irlanda), Sifnos (Grecia), Culatra (Portogallo) e La Palma (Canarie, Spagna). Altre 20 isole dell'Unione, fra cui Favignana e Pantelleria per l'Italia, avvieranno le attività entro l'estate 2020<sup>[1]</sup>.

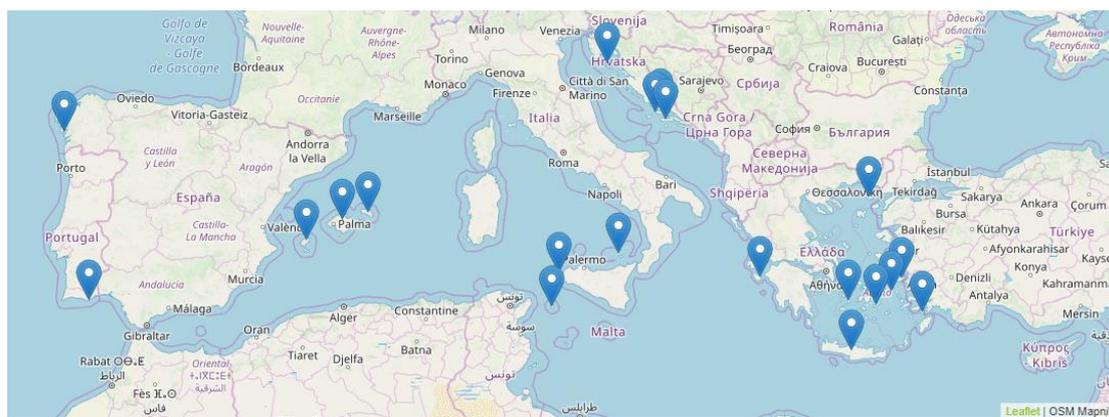


Figura 47 - Mappa delle isole scelte per il Mar Mediterraneo<sup>[4]</sup>.

Prima isola in Italia a essere scelta per questa iniziativa è dunque l'isola di Salina che insieme all'arcipelago delle Eolie è patrimonio dell'UNESCO, per il suo paesaggio e patrimonio naturalistico. Essa ha iniziato la sua strada verso la sostenibilità ambientale nel 2013 con la firma del "Patto delle isole", grazie al quale i tre Comuni isolani (Malfa, Santa Marina di Salina e Leni) hanno elaborato i bilanci di energia ed emissioni di CO<sub>2</sub> e i Piani d'azione per l'energia sostenibile (PAES). Hanno avuto seguito la candidatura al programma europeo, da parte di ENEA e Regione Siciliana, assieme alle tre amministrazioni comunali dell'isola, all'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e alle associazioni locali<sup>[1]</sup>.

Attraverso il loro impegno, i firmatari del Patto intendono raggiungere e superare l'obiettivo europeo di riduzione del 20% delle emissioni di CO<sub>2</sub> entro il 2020. Salina vuole superare questi target intervenendo ovunque possibile sui vari ambiti, ossia: sulla riqualificazione degli edifici e degli impianti pubblici con interventi di efficientamento che vanno dall'isolamento termico degli involucri all'illuminazione, all'installazione di impianti a fonti energetiche rinnovabili, solare termico e fotovoltaico; sugli edifici pubblici e residenziali, che verranno promossi con appositi

incentivi; su trasporti e mobilità pubblica e privata, prevedendo veicoli ibridi e stazioni di ricarica di biciclette e veicoli elettrici, e avviando un'intensa attività di informazione e sensibilizzazione dei cittadini. Tutti e tre i Sindaci si sono poi dichiarati determinati a conferire all'isola un'altra medaglia, ossia quella di "*Isola Sostenibile*", in primis per la qualità della vita dei cittadini e anche perché fortemente convinti che questa potrà anche essere un'importante opportunità di attrazione turistica per l'isola, che è già meta degli amanti della natura e dell'ambiente <sup>[5]</sup>.

## 4.2 INQUADRAMENTO DEL SITO

In tale ambito il seguente elaborato di tesi si pone, per l'appunto, l'obiettivo di verificare la fattibilità di installazione di WECs galleggianti in prossimità dell'isola di Salina con conseguente valutazione delle prestazioni e della produzione di energia sfruttando il moto ondoso.

Per ottenere un maggiore rendimento delle macchine, le autorità locali hanno scelto il sito di installazione in prossimità del porto di Scalo Galera (vedi Figura 48), situato nel versante nord dell'isola in concomitanza del Comune di Malfa (975 abitanti), al fine di sfruttare il vento da NO che imperversa in tale zona. I dispositivi potrebbero essere posizionati in corrispondenza di un fondale di circa 20 m sotto il livello di medio mare (Figura 49).



Figura 48 - Sito di installazione, Drakoo WEC proposto per Malfa <sup>[8]</sup>.



**Figura 49 - Vista da Est e da Ovest del Comune di Malfa.**

I porti di approdo principali sono quelli di Santa Marina di Salina e di Rinella, il porto di Scalo Galera è un piccolo porticciolo di pescatori (circa una decina di posti barca), turistico e anche per diportisti (da qui partono le escursioni dal comune di Malfa per le altre isole)<sup>[7]</sup>.

Tuttavia recentemente sono stati investiti oltre diciannove milioni di euro per completare la riqualificazione del porticciolo. Decisione presa dal governo Musumeci della Regione Sicilia, che ha approvato la proposta del dipartimento regionale alle Infrastrutture di utilizzare le risorse liberate della misura 6.03 del Por Sicilia 2000/2006<sup>[9]</sup>.

L'ultimazione dei lavori è prevista entro il 2020. Una volta completati i lavori il porto malfitano sarà lungo 110 metri circa e potrà ospitare una sessantina di barche da diporto e da pesca. L'amministrazione comunale, guidata dal sindaco Clara Rametta, guarda, però, oltre e candida la struttura quale possibile scalo alternativo per l'isola di Salina<sup>[10]</sup>.

Dal punto di vista economico, l'isola si basa sull'agricoltura (vite, uva passa, olive, capperi), artigianato e pesca. Rinomata è la produzione di vino, sono molte le aziende dell'isola che producono insieme al Malvasia, prodotto di eccellenza di Salina, vini di alta qualità ottenuti soprattutto col favore del microclima. Gran parte dell'economia dell'isola gravita intorno al turismo, che si anima soprattutto nei mesi di luglio ed agosto. Ma benché vivace, l'attività turistica non ha mai sull'isola un carattere invasivo<sup>[7]</sup>.

Dal punto di vista geologico e geomorfologico Salina è la più alta (962 m s.l.m.) e la seconda più grande (26.4 km<sup>2</sup>) isola delle Eolie. Essa è formata da sei crateri estinti, tra cui quelli di formazione più antica di Pizzo di Corvo, monte Rivi e un altro in prossimità di Capo Faro, praticamente irriconoscibili nella loro struttura morfologica. Della natura vulcanica di quest'isola resta solo il fenomeno degli sconnessi che si manifestano nel fondale di Rinella. Soggetta maggiormente al fenomeno erosivo è la costa N.O. dell'isola in prossimità del cratere di Pollara, costituito principalmente da tufi, pomice bianche, andesite e mica. Uno dei casi più eclatanti riguarda infatti la spiaggia di Pollara che a causa delle mareggiate si è ridotta da 10 m nel 1994 ai 4 m attuali <sup>[11]</sup>.

Il sito di interesse per l'installazione dei dispositivi (evidenziato dall'area in giallo vedi Figura 50) presenta invece una stratigrafia composta da cineriti, tufi e tufi brecciati, colate di fango, lahars (Tufi grigi dei Porri) e piroclastiti del Vulcano del Capo costituite in prevalenza da scorie <sup>[6]</sup>.

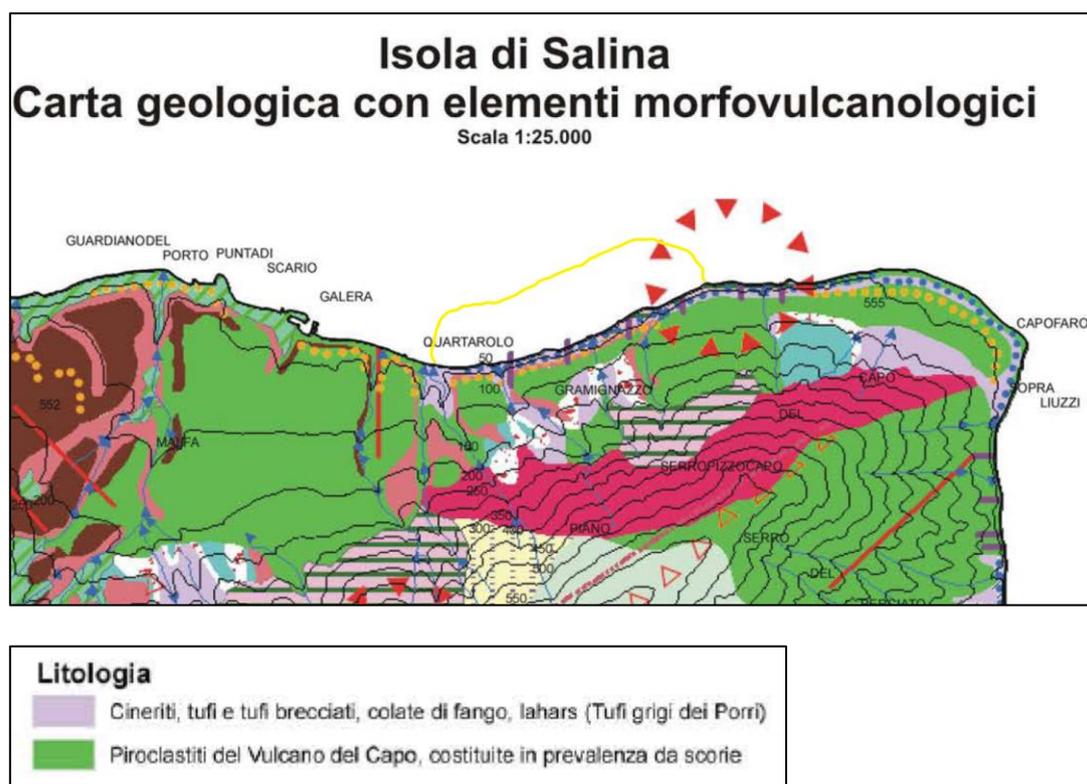


Figura 50 – Carta geologica con elementi morfovolcanologici, scala 1:25.000 dell'isola di Salina<sup>[6]</sup>.

A fronte di quanto detto finora, si intende valutare e osservare se la produzione di energia da WEC potrà soddisfare le esigenze del Comune di Malfa e/o dell'isola.

### 4.3 ANALISI DEI DATI ONDOSI

Per effettuare le analisi di producibilità sulla base di una statistica del clima ondoso della zona, sono stati utilizzati i dati ondosi di 12 anni da modello hindcast (dal 2006 al 2018) del Servizio Europeo di Monitoraggio Ambientale Marino, Copernicus, estratti a largo dell'isola. Copernicus, precedentemente noto come GMES (Global Monitoring for Environment and Security), è il programma europeo per l'osservazione e il monitoraggio della Terra. I servizi di Copernicus riguardano sei aree tematiche principali: monitoraggio del territorio, gestione dell'emergenza, monitoraggio marino, monitoraggio dell'atmosfera, sicurezza e cambiamento climatico <sup>[12]</sup>.

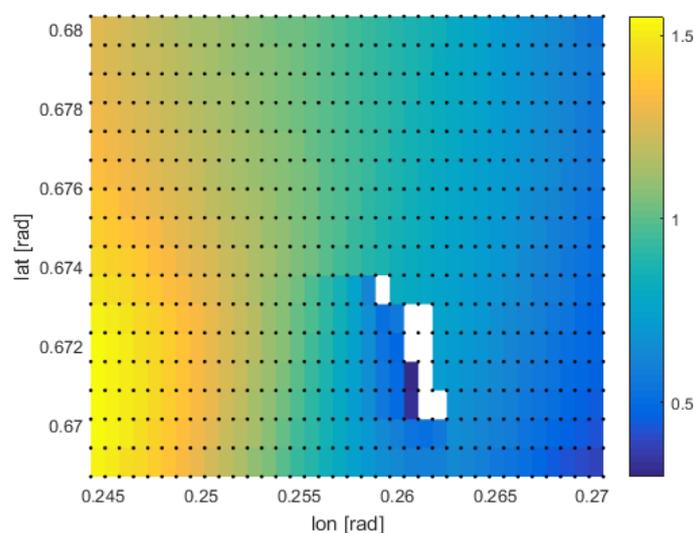
Dal database, dunque, sono stati prelevati i dati di 12 anni di serie hindcast (dal 01/31/2006 al 01/01/2018) composti da parametri delle onde orarie con risoluzione orizzontale di  $1/24^\circ$ , che copre il Mar Mediterraneo e si estende fino a  $-18.125^\circ$  W nell'Oceano Atlantico. È prodotto dal sistema di previsione delle onde del Mar Mediterraneo, che è un modello ondoso basato sul ciclo WAM 4.5.4, il quale è stato sviluppato come una sequenza annidata di due griglie computazionali (grossolana e fine) per garantire che le onde si propaghino dal Nord Atlantico (NA) verso lo stretto di Gibilterra in modo corretto nel Mediterraneo (MED). La griglia grossolana copre l'Oceano Atlantico del Nord da  $75^\circ$ W a  $10^\circ$ E e da  $70^\circ$ N a  $10^\circ$ S in risoluzione  $1/6^\circ$ , mentre la griglia sottile annidata copre il Mediterraneo da  $18.125^\circ$ W a  $36.2917^\circ$ E e da  $30.1875^\circ$ N a  $45.9792^\circ$  S con una risoluzione di  $1/24^\circ$  (circa 4.6 Km). Il sistema di modellazione Med-Waves risolve la parte prognostica dello spettro d'onda con 24 bins di frequenza direzionali e 32 bins logaritmicamente distribuiti <sup>[13]</sup>. Nel caso in esame è stata scelta un'area del Mar Mediterraneo che si estende da  $39^\circ$ N a  $38.3^\circ$ S e da  $14^\circ$ E a  $15.5^\circ$ W (vedi Figura 52).

I dati ondosi sono stati scaricati in formato nctdf (Network Common Data Form) comunemente usato per climatologia, meteorologia, oceanografia e applicazioni GIS. Per poter utilizzare questi file è stata impostata una routine Matlab ed è stato scaricato ed attivato il toolbox Matlab denominato nctoolbox, il quale per l'appunto fornisce accesso in sola lettura a dataset di modelli di dati comuni. Esso utilizza NetCDF-Java come livello di accesso ai dati <sup>[14]</sup>. Per l'attivazione è necessario caricare su Matlab la cartella con i file del toolbox scaricati.

I parametri caratteristici delle onde contenuti nei file sono i seguenti: VTPK ( $T_p$ ), VHM0 ( $H_{m0}$ ), VTM10 ( $T_{m10}$ ), VMDR ( $D_m$  direzione in gradi), lon (longitudine), lat (latitudine), time (tempo). Nel nostro caso i parametri che ci serviranno e che andremo a salvare sono  $H_{m0}$ ,  $T_p$  e  $D_m$  naturalmente tutti in funzione del tempo.

Per passare dalle coordinate geografiche (lat e lon) alle coordinate cartografiche UTM per il datum WGS84 è stata utilizzata la funzione `ell2utm` definendo l'eccentricità  $e2$ .

È stata dunque ricavata una mappa in Figura 51 che rappresenta la variazione (a colori) dell'altezza d'onda significativa  $H_{m0}$  rispetto alle coordinate geografiche, selezionando i valori di onde per le prime 10 ore dell'anno.



**Figura 51 - Mappa di variazione dell' $H_s$  per i dati estrapolati da Copernicus.**

La mappa rappresenta per un anno di dati una matrice di nodi  $17 \times 37$  per l'area di interesse, in cui i nodi rappresentano i punti dove si hanno i dati. Si evidenzia che la macchia in bianco più piccola è l'isola di Salina e la più grande rappresenta le isole di Vulcano (in basso) e Lipari (in alto). A causa della bassa risoluzione del modello, le altre isole non vengono individuate.

Evidenziando che il massimo fetch di Malfa (sia per le onde che per il vento) poteva essere in direzione NO si sono presi tutti i nodi corrispondenti alla latitudine di interesse (corrispondenti alla riga 10 della matrice in questo caso).

Dunque i punti di estrazione dei dati si trovano in corrispondenza di un fondale di circa 2000 m e distano circa 12 Km dal luogo di installazione del WEC sotto costa.

Si riporta la Figura 52 con alcuni nodi dei 37 scelti e con i nodi A, B, C e D che delimitano il confine dell'area di interesse selezionata:

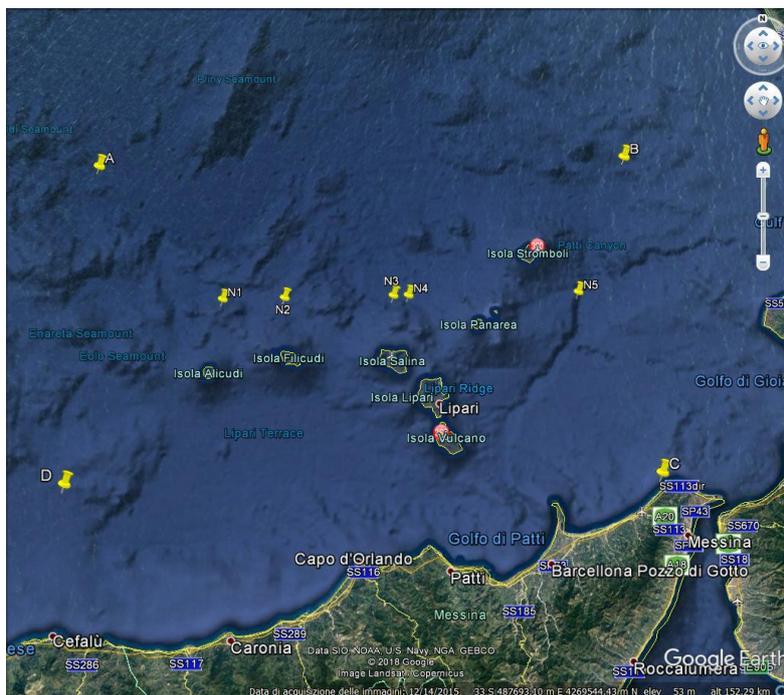


Figura 52 - Vista satellitare del sito in esame [21].

Per il primo anno in esame e per tre generici nodi tra quelli scelti, si riportano i grafici in Figura 53 e Figura 54 rappresentanti i parametri dell'onda  $H_{m0}$  e  $T_p$  per la stessa coordinata Nord al fine di constatare la variabilità degli stessi nel tempo.

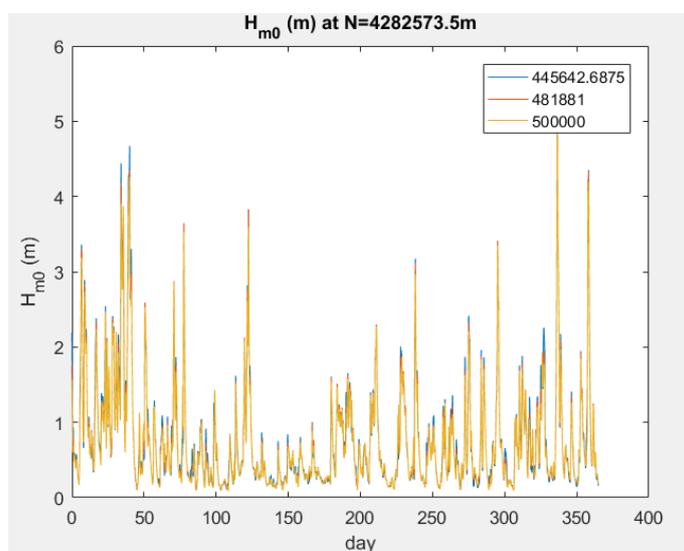


Figura 53 - Variabilità di  $H_{m0}$  nel tempo per il primo anno in esame e per tre generici nodi.

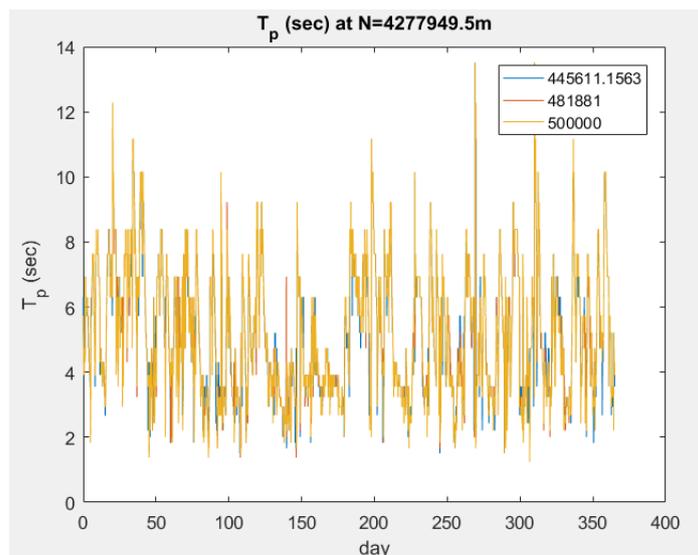


Figura 54 - Variabilità di  $T_p$  nel tempo per il primo anno in esame e per tre generici nodi.

#### 4.4 MODELLAZIONE DEL CLIMA ONDOSO VERSO RIVA

La modellazione numerica per la caratterizzazione del clima ondoso sotto costa è stata sviluppata utilizzando un modello spettrale per la propagazione dell'energia spettrale dell'onda dal nodo di CMEMS alla zona di prevista installazione dei WEC.

Il MIKE 21, distribuito da DHI group, è un modello numerico bidimensionale per la simulazione di correnti, onde, trasporto solido e qualità delle acque in fiumi, laghi, baie, aree costiere e mare aperto <sup>[15]</sup>.

Al fine di impostare il modello e trasferire i dati d'onda sotto costa, è stato necessario introdurre, in primo luogo, la batimetria della zona di interesse. Sono stati utilizzati dunque dati batimetrici digitali scaricati dal sito EMODnet DTM, un'iniziativa di dati marittimi a lungo termine che dall'analisi di tali dati permette di creare mappe multi-risoluzione di tutti i mari e gli oceani europei <sup>[24]</sup>.

I dati, che risalgono a settembre 2018, sono stati scaricati in formato ASC, con una risoluzione della griglia pari a  $1/16^\circ$  per  $1/16^\circ$  di arco (circa  $115 \times 115$  m). Sono stati utilizzati questi dati batimetrici proprio per la loro buona risoluzione e la facile reperibilità.

Oltre alla batimetria è stata caricata anche la linea di costa digitale dell'isola di Salina. I dati vettoriali in scala 1:2000, scaricati dal sito SITR (Sistema Informativo Territoriale Regionale), erano riferiti all'intera Regione Sicilia isole comprese. Il

dataset è stato digitalizzato come polilinea chiusa a video dalle ortofoto digitali (volo ATA 2007-2008) [16]. I dati scaricati in formato shape sono stati prima analizzati su QGIS e successivamente sono stati caricati su MIKE, qui sono stati cancellati i dati superflui per non sovraccaricare il modello ed è stata considerata solo la linea di costa della zona di interesse.

I suddetti dati sono stati inseriti su MIKE impostando le corrispettive coordinate di riferimento: ROMA40 EST Gauss-Boaga per la linea di costa e long-lat per la batimetria.

Si è proceduto dunque al tracciamento del confine a largo su cui impostare la generazione dell'onda. È necessario innanzitutto avere un dato spaziale (di  $H_{m0}$ ,  $T_p$  e  $D_m$  dell'onda) costante sul dominio al fine di effettuare la simulazione della propagazione delle onde da largo a riva. Per far ciò è stato selezionato un nodo significativo tra quelli visti nel paragrafo precedente, il nodo 20 (vedi Figura 56). Tale nodo è stato scelto in una zona a batimetria uniforme al fine di creare delle mesh più definite possibili. Inoltre la scelta del nodo è stata fatta non solo osservando le altezze d'onda per quel nodo nei 12 anni di serie hindcast, ma anche osservando il *fetch geografico* (vedi Figura 55 e Figura 56). Quest'ultimo viene individuato tracciando le rette che congiungono il punto di installazione del WEC, a -20 m di fondale, ai punti della terra ferma più vicini. Si evidenzia così il *paraggio* (o traversia), zona con massima probabilità di avere l'onda, i cui estremi sono a Ovest la Sardegna e ad Est l'Isola di Panarea.

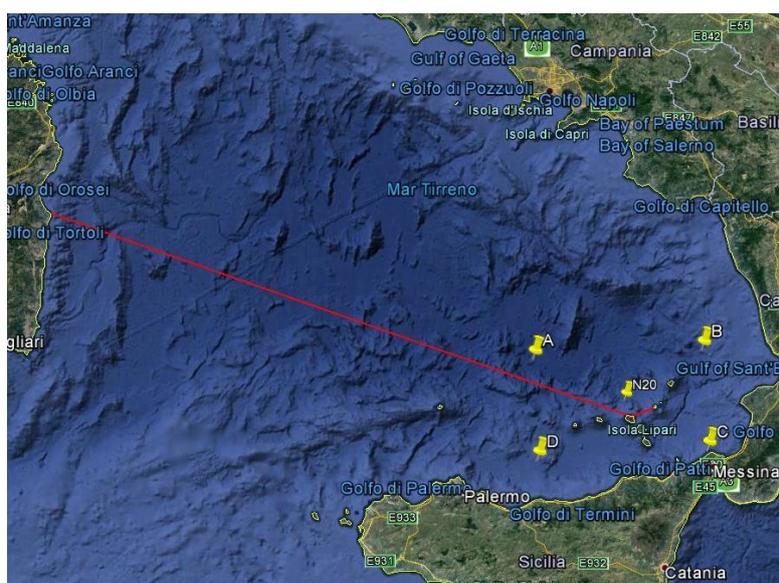


Figura 55 - Vista satellitare tracciamento fetch geografico [21].

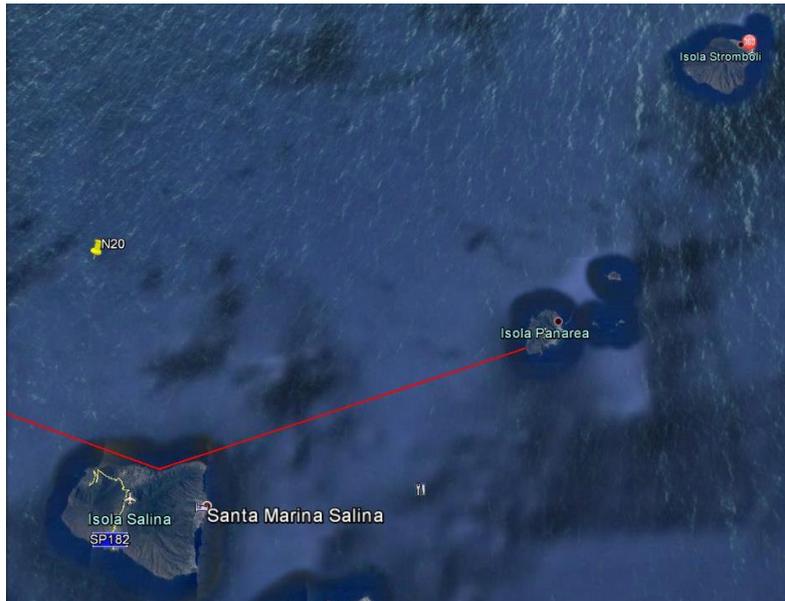


Figura 56 - Vista satellitare del fetch geografico e del nodo 20 scelto per la simulazione su MIKE [21].

Dalla mappa (Figura 56) si evidenzia che la zona Est di Salina è più schermata, per cui si è cercato di creare un confine che consideri tutto lo spazio di propagazione dell'onda nella zona Ovest (Figura 57).

Dunque è stata impostata una mesh più grande in corrispondenza del nodo 20 alla coordinata N=4277000 m, una mesh più piccola in corrispondenza del porto e della zona d'installazione dei dispositivi allo scopo di fittare maggiormente la zona di interesse, ed infine una terza mesh intermedia nei pressi della zona N.E. delle montagne sommerse.

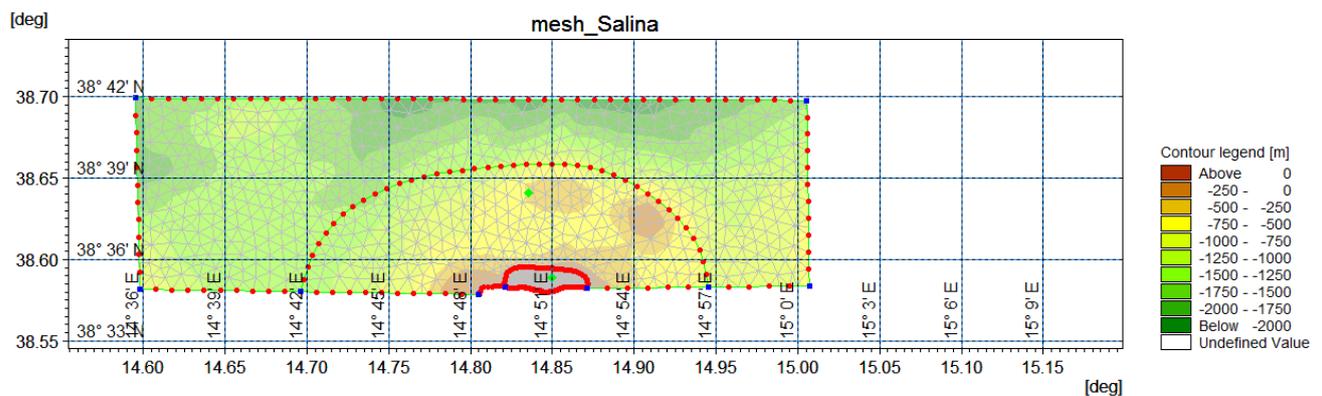


Figura 57 - Mesh del sito in esame creata per la simulazione su MIKE.

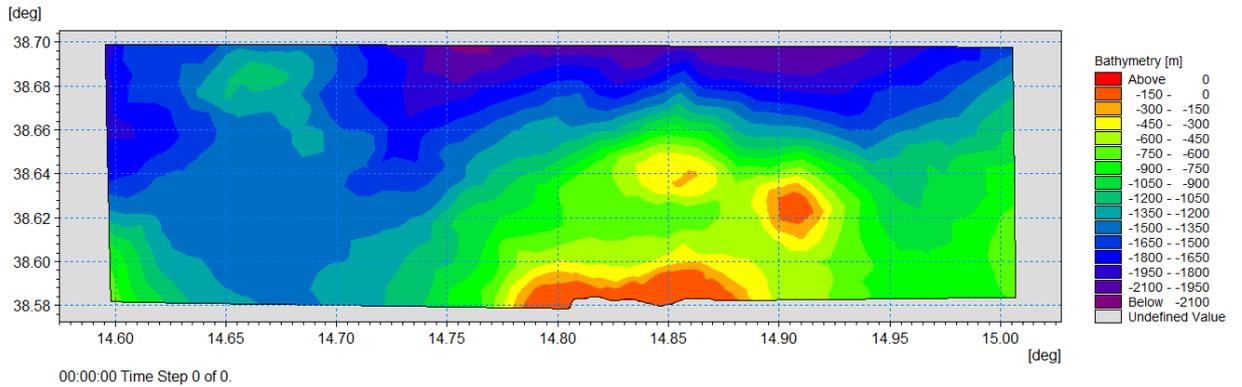


Figura 58 - Mappa batimetrica del sito in esame (MIKE21).

A questo punto dopo aver generato la mesh (Figura 57), è stata effettuata l'interpolazione della batimetria sulla mesh di calcolo, ed infine sono state inserite le condizioni al contorno (Figura 58). Il code 1 rappresenta la linea di costa e viene rappresentato come una land, il code 4 rappresenta le onde in entrata nella boundary e qui sono stati inseriti i dati dell'onda del nodo 20 per l'intera serie storica, gli altri code sono stati lasciati liberi inserendo semplicemente l'opzione "lateral boundary". Poi sono state inserite le coordinate dei WEC da installare (qui sono stati inseriti tre punti le cui coordinate sono state prese facendo riferimento ai punti di installazione dei WEC definiti precedentemente, vedi Figura 48), su cui estrarre i risultati del modello numerico.

Infine dopo aver impostato il modello, è stata effettuata la simulazione e sono state ricavate le caratteristiche dell'onda sotto costa. Si riportano quindi in Tabella 12 le frequenze di accadimento degli eventi relativi ai 12 anni analizzati e rispetto alla posizione di uno dei tre WEC.

Tabella 12 – Frequenze di accadimento degli eventi per i 12 anni di studio.

|        |           | Hs (m)  |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |     |   |   |   |
|--------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----|---|---|---|
|        |           | < 0.500 | 0.5     | 1       | 1.5     | 2       | 2.5     | 3       | 3.5     | 4       | 4.5     | 5       | 5.5 |   |   |   |
| Tp (s) | < 2.000   | 0.010   | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0   | 0 | 0 | 0 |
|        | 2         | 0.076   | 0.0003  | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0   | 0 | 0 | 0 |
|        | 3         | 0.187   | 0.015   | 0.00005 | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0   | 0 | 0 | 0 |
|        | 4         | 0.134   | 0.041   | 0.003   | 0.00004 | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0   | 0 | 0 | 0 |
|        | 5         | 0.091   | 0.061   | 0.019   | 0.003   | 0.0002  | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0   | 0 | 0 | 0 |
|        | 6         | 0.043   | 0.075   | 0.031   | 0.012   | 0.004   | 0.001   | 0.00001 | 0       | 0       | 0       | 0       | 0   | 0 | 0 | 0 |
|        | 7         | 0.019   | 0.026   | 0.021   | 0.009   | 0.003   | 0.001   | 0.001   | 0       | 0       | 0       | 0       | 0   | 0 | 0 | 0 |
|        | 8         | 0.011   | 0.013   | 0.013   | 0.011   | 0.005   | 0.002   | 0.001   | 0.0001  | 0       | 0       | 0       | 0   | 0 | 0 | 0 |
|        | 9         | 0.005   | 0.007   | 0.006   | 0.006   | 0.004   | 0.003   | 0.001   | 0.0002  | 0.00002 | 0       | 0       | 0   | 0 | 0 | 0 |
|        | 10        | 0.003   | 0.004   | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.001   | 0.001   | 0.001   | 0.0002  | 0.0001  | 0       | 0   | 0 | 0 | 0 |
|        | 11        | 0.001   | 0.001   | 0.001   | 0.001   | 0.00031 | 0.00021 | 0.00024 | 0.00007 | 0.00025 | 0.00010 | 0.00003 | 0   | 0 | 0 | 0 |
|        | 12        | 0.001   | 0.0002  | 0.0003  | 0.0003  | 0.0001  | 0       | 0.00003 | 0.00007 | 0.00000 | 0.00002 | 0.00005 | 0   | 0 | 0 | 0 |
|        | 13        | 0.0003  | 0.00001 | 0.00001 | 0.00003 | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0   | 0 | 0 | 0 |
|        | 14        | 0.0002  | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0   | 0 | 0 | 0 |
|        | 15        | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0   | 0 | 0 | 0 |
|        | 16        | 0.00005 | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0   | 0 | 0 | 0 |
|        | >= 17.000 | 0.00005 | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0   | 0 | 0 | 0 |

Ogni valore rappresenta la % di accadimento per un determinato evento che ricade in una determinata classe, definita da  $H_s$  e  $T_p$ .

Complessivamente le frequenze sono molto basse soprattutto per eventi di maggiore entità.

I risultati sono rappresentati tramite la rosa dei venti sia per i dati offshore (Figura 59), come ottenuti da CMEMS, che per quelli nel punto di installazione, ricavati dal MIKE21 (Figura 60).

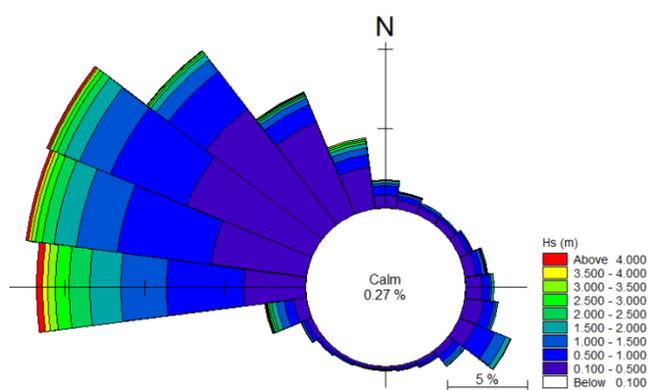


Figura 59 - Rosa dei venti per i dati off-shore.

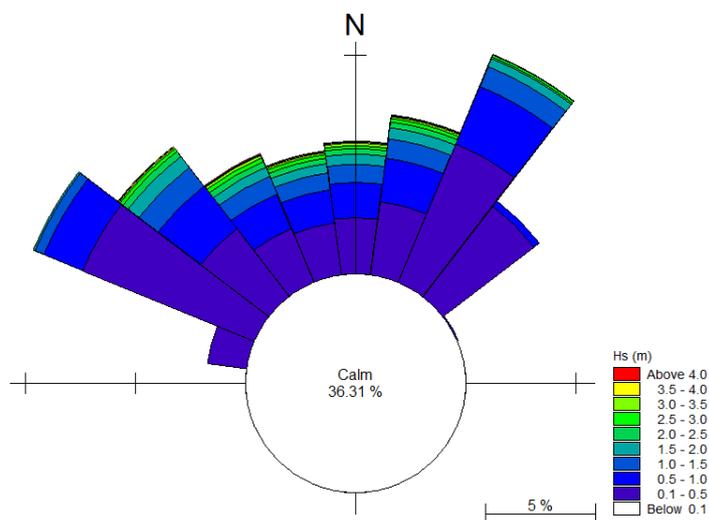


Figura 60 - Rosa dei venti per i dati in-shore.

Si nota in quest'ultimo caso che, rispetto all'entità dell'altezza d'onda significativa a largo, l'onda è limitata molto dal fetch e dalla vicinanza alla costa.

## 4.5 MATRICI DI POTENZA E PRODUCIBILITÀ DEI WEC

La matrice di potenza è una matrice bidimensionale che combina tutte le potenze (in kW) di uscita del dispositivo per ciascun diverso stato del mare, caratterizzato dal periodo di picco  $T_p$  e dall'altezza d'onda  $H_s$ . Al fine di valutare le prestazioni generali dei dispositivi sono state riportate prima le matrici di potenza originarie, fornite dal costruttore, ottenute per stati marini da moderati ad alti. Tali matrici sono sovradimensionate rispetto ai climi ondososi più miti (come quello del Mar Mediterraneo), dove non sarebbero in grado di funzionare in modo soddisfacente e non possono essere economicamente sostenibili. Per lavorare in climi meno energetici, i WEC dovrebbero essere ridimensionati per adattarsi alle condizioni dell'onda locale. Un'adeguata riduzione delle dimensioni consente infatti di catturare l'energia delle piccole onde e ciò consente di massimizzare la produzione di energia dei dispositivi.

Pertanto, per scalare la producibilità dei WEC, viene utilizzata la *similitudine di Froude* da cui risulta:  $H_s$  lineare con la scala geometrica  $\lambda$ ,  $T_p$  con  $\lambda^{0.5}$ , la potenza della macchina con  $\lambda^{7/2}$  seguendo l'approccio descritto da [17].

Si ricorda che per ogni stato del mare, la potenza della macchina per unità di lunghezza del fronte d'onda (kW/m) è data da:

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

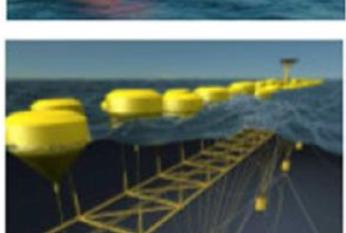
dove  $\rho$  è la densità dell'acqua ( $1025 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  è la gravità e  $T_e$  è il periodo energetico pari a  $1,1 T_p$ .

In questo caso è stato scelto un fattore di scala pari a 0.25 tale da ottimizzare il capacity factor (CF) della macchina per il sito in esame (si vedano gli studi precedentemente effettuati per il Mar Mediterraneo nei siti di Lampedusa, Pantelleria, Alghero e Mazara Del Vallo, in [17] e [18]).

I dispositivi scelti per la verifica di fattibilità nel sito di Salina sono riportati in Tabella 13.

In aggiunta, per le verifiche di producibilità sono stati scelti inoltre due dispositivi (Figura 61) che sono stati dimensionati per il Mar Mediterraneo nel 2017 <sup>[22]</sup>. Sono note le matrici di potenza e non si deve effettuare il downscaling.

Tabella 13 - Principali caratteristiche dei WEC proposti <sup>[17]</sup>.

| Name     | Structure                           | Classification                   | Energy mode    | PTO                       | Rated power [kW] | Ref.                      | Picture   |
|----------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------|---------------------------|------------------|---------------------------|---|
| AquaBuOY | Two-body floating system            | Point absorber                   | Heave          | High-head water turbine   | 250              | Dunnett and Wallace, 2009 |    |
| Langlee  | Semi-submerged three-body structure | Oscillating wave surge converter | Surge          | Hydraulic motor           | 1665             | Babarit et al., 2012      |    |
| Oebuoy   | Single-body floating system         | Oscillating water column         | Surge          | Bidirectional air turbine | 2880             | Babarit et al., 2012      |   |
| Pelamis  | Four-body floating system           | Attenuator                       | Heave and sway | Hydraulic motor           | 750              | Dunnett and Wallace, 2009 |  |
| Pontoon  | Multibody floating structure        | Multiple point absorber          | Heave          | High-head water turbine   | 3619             | Babarit et al., 2012      |  |
| SeaPower | Two-body platform                   | Attenuator                       | Pitch          | Pump or hydraulic motor   | 3587             | Sea Power Ltd, 2017       |  |
| Wavebob  | Two-body floating system            | Point absorber                   | Heave          | Hydraulic motor           | 1000             | Babarit et al., 2012      |  |

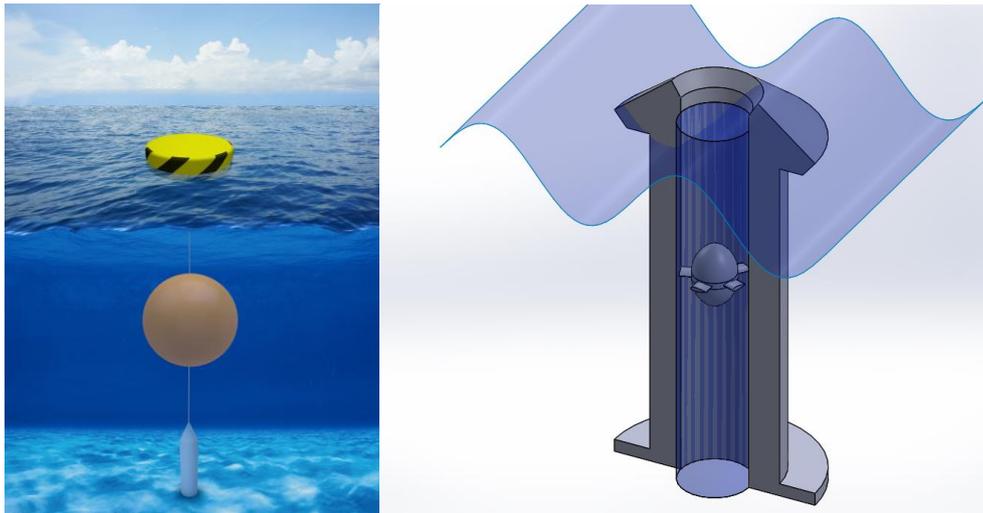


Figura 61 – WEC proposti: HPA-LG seabed (a sinistra), moonWEC (a destra)<sup>[22]</sup>.

Il primo, denominato HPA-LG seabed (Heaving Point Absorber Linear Generator), è un dispositivo a tre corpi composto da una struttura galleggiante, un corpo sommerso di assetto neutro e una PTO, utilizzata per generare l'elettricità. È stato classificato come Point Absorber con struttura multy-body. Ha una potenza nominale pari a 13.62 kW. Il secondo, denominato moonWEC, è costituito invece da una struttura galleggiante cilindrica cava, al cui interno è presente una turbina Wells. Quando è immerso in acqua, il cilindro viene sommerso e riempito creando un fenomeno comunemente noto come moonpool. Tale dispositivo è stato classificato come Point Absorber con corpo oscillante in heave e funzionamento a colonna d'acqua oscillante. La potenza nominale è pari a 107.97 kW.

Tali dispositivi sono ancora in fase di sperimentazione da parte dell'Università di Bologna. È fondamentale sottolineare che di tutti i dispositivi proposti si conoscono le caratteristiche e le matrici di potenza necessarie per effettuare l'analisi di producibilità.

Le tabelle con le matrici di potenza delle macchine sono riportate in Appendice B.

Per i primi dispositivi sono state ricavate, dunque, le matrici di potenza relative al sito di Salina, in un primo momento senza effettuare il down scaling, moltiplicando la frequenza di accadimento degli eventi (vedi Tabella 12) per il numero di ore in un anno e per la corrispettiva potenza della macchina. Ottenendo così una matrice che rappresenta l'energia in MWh prodotta in un anno. È stata poi valutata l'energia massima producibile dalla macchina per il sito di Salina, data dalla somma dei valori

dell'intera matrice. A questo punto è stata scalata direttamente l'energia totale, secondo il fattore di scala precedentemente discusso.

Infine è stato ricavato il capacity factor del dispositivo dato dal rapporto tra la produzione reale e la produzione massima annuale.

Stessi calcoli sono stati effettuati per il moonWEC e il HPA-LG, senza eseguire downscaling.

Nella Tabella 14 si riportano i risultati di tale analisi di producibilità delle macchine per il sito di Salina.

**Tabella 14 – Producibilità dei WEC analizzati per il sito di Salina.**

| WEC             | Fattore di scala<br>[-] | Potenza nominale<br>[kW] | Energia Annuale<br>[MWh] | CF<br>[%]    |
|-----------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|
| <b>AquaBuOY</b> | 0.25                    | 250                      | <b>0.21</b>              | <b>0.010</b> |
|                 | 0.50                    |                          | 2.42                     | 0.111        |
| <b>Langlee</b>  | 0.25                    | 1665                     | <b>0.93</b>              | <b>0.006</b> |
|                 | 0.50                    |                          | 10.50                    | 0.072        |
| <b>OE buoy</b>  | 0.25                    | 2880                     | <b>0.70</b>              | <b>0.003</b> |
|                 | 0.50                    |                          | 7.91                     | 0.031        |
| <b>Pelamis</b>  | 0.25                    | 750                      | <b>0.77</b>              | <b>0.012</b> |
|                 | 0.50                    |                          | 8.74                     | 0.133        |
| <b>Pontoon</b>  | 0.25                    | 3619                     | <b>2.43</b>              | <b>0.008</b> |
|                 | 0.50                    |                          | 27.55                    | 0.087        |
| <b>SeaPower</b> | 0.25                    | 3587                     | <b>1.30</b>              | <b>0.004</b> |
|                 | 0.50                    |                          | 14.73                    | 0.047        |
| <b>Wavebob</b>  | 0.25                    | 1000                     | <b>0.71</b>              | <b>0.008</b> |
|                 | 0.50                    |                          | 8.04                     | 0.092        |

| WEC                  | Potenza nominale<br>[kW] | Energia Annuale<br>[MWh] | CF<br>[%]   |
|----------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|
| <b>moonWEC</b>       | 107.97                   | <b>2.44</b>              | <b>0.26</b> |
| <b>HPA-LG seabed</b> | 13.62                    | <b>5.17</b>              | <b>4.33</b> |

È stato applicato anche un fattore di scala del 50% al fine di constatare la producibilità delle macchine in condizioni ondose tipiche del Mar Mediterraneo.

Da questo confronto è possibile notare l'aumento della potenza prodotta nei vari casi. La maggiore produzione di energia annuale si riscontra nel HPA-LG seabed, tuttavia risulta bassissima.

Se una famiglia di quattro persone in media consuma circa 2.7 MWh all'anno, tale dispositivo fornirebbe energia solo a due famiglie. Si dovrebbero installare circa un centinaio di seabed per fornire energia all'intero Comune di Malfa di 975 abitanti. Per non parlare delle dimensioni stesse del dispositivo che sono eccessive e installarne tanti in una stessa zona comporterebbe un non trascurabile impatto visivo e ambientale.

Bisogna anche tenere presente che il calcolo effettuato per ricavare l'energia producibile ha dei forti limiti poiché non considera diversi fattori quali: tempi di inattività del dispositivo, soglie sulle batterie e posizionamento delle batteria stesse (si può optare o per cavi ancorati al fondo che raggiungono la riva comportando forti impatti ambientali, oppure creando degli storage locali comportando così necessari tempi di carico e scarico batterie), efficienza idraulica, presenza degli ancoraggi, eccetera.

Facendo un confronto con la producibilità dell'AquaBuOY e del Pelamis per i siti più energetici di Mazara del Vallo e Alghero (riportati in [18]) si evidenzia la netta inefficienza dei dispositivi per il sito in esame.

**Tabella 15 - Caratteristiche e performance dei dispositivi su vasta scala nei siti di Alghero e Mazara del Vallo<sup>[18]</sup>.**

|   | Alghero  |         |             | Mazara   |         |             |
|---|----------|---------|-------------|----------|---------|-------------|
|   | AquaBuOY | Pelamis | Wave Dragon | AquaBuOY | Pelamis | Wave Dragon |
| Rated power [kW]  | 250      | 750     | 7000        | 250      | 750     | 7000        |
| Mean power output [kW]                                      | 22       | 71      | 616         | 9        | 32      | 270         |
| Annual energy output [MWh]                                  | 192      | 619     | 5400        | 81       | 278     | 2362        |
| Full load hours [h]   | 766      | 825     | 771         | 323      | 371     | 337         |
| Capacity factor [%]   | 8.7      | 9.4     | 8.8         | 3.7      | 4.2     | 3.9         |
| Coefficient of variation of monthly time series [%]         | 42       | 43      | 44          | 66       | 62      | 62          |
| Correlation coefficient between energy input and output [-] | 0.97     | 0.98    | 0.98        | 1.00     | 1.00    | 1.00        |

A fronte di queste osservazioni non risulta economicamente ed energeticamente soddisfacente l'installazione di tali dispositivi che non sarebbero completamente capaci di soddisfare da soli le esigenze del Comune di Malfa né tantomeno dell'isola di Salina.

## 5. CONCLUSIONI

In questa tesi sono stati esaminati gli aspetti che riguardano gli oggetti galleggianti utilizzati nell'ambito dell'ingegneria costiera.

In particolare, la prima parte dell'elaborato si è occupata dell'analisi dei dati di esperimenti eseguiti presso il Laboratorio di Ingegneria Idraulica LIDR del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali, DICAM, dell'Università Alma Mater Studiorum di Bologna.

Le prove sono state eseguite in canale, su due oggetti galleggianti, un box e un cilindro, ancorati al fondo e sottoposti a carichi ondosi regolari e irregolari generate mediante un battonde. I test sono stati eseguiti su diverse configurazioni del corpo galleggiante in relazione al tipo di ancoraggio e all'affondamento dello stesso.

Oggetto dello studio è stato lo studio della dinamica del galleggiante cilindrico, sottoposto a onde regolari, e con diverse configurazioni di ancoraggi.

Dopo aver fatto una stima delle altezze d'onda significative mediante l'analisi delle misure delle sonde eseguite in fase di riflessione e trasmissione, e l'analisi della riflessione stessa dell'oggetto è stata effettuata l'analisi della dinamica del cilindro galleggiante nelle due direzioni principali, cioè le traslazioni in direzione verticale e nella direzione dell'asse del canale (heave e surge). Inoltre è stata analizzata l'ampiezza di oscillazione tramite la valutazione del parametro adimensionale RAO.

È stata dunque osservata la sostanziale differenza tra il movimento del cilindro con cavi obliqui e con catenaria. L'oscillazione, lungo le due direzioni studiate, nel caso della catenaria risulta essere di maggiore entità, ma è stata osservata un'oscillazione anche in altre direzioni (dinamica 3D), attribuibile alla non linearità dell'onda nel canale. Nel caso dei cavi obliqui è stato riscontrato invece un movimento meno fluido del cilindro, principalmente nel caso con minore affondamento, dovuto alla tensione che i cavi stessi esercitano sull'oggetto.

Quanto visto è stato dedotto da una analisi dei video, che andrebbe ad integrare e validare l'utilizzo di un modello numerico CFD.

La seconda parte della tesi è stata incentrata invece su una possibile applicazione di installazione di dispositivi galleggianti ancorati in mare e soggetti all'attacco del moto ondoso. Si è analizzata la fattibilità di "Wave Energy Converters" nell'isola di

Salina. Dopo aver effettuato un inquadramento generale del sito e del progetto “Salina Isola Sostenibile”, è stata effettuata un’analisi di producibilità energetica per alcuni dispositivi noti proposti per il sito in esame. Sono stati scelti dispositivi dimensionati direttamente nel Mar Mediterraneo e dispositivi dimensionati per condizioni climatiche da moderate a elevate. In questi casi è stata applicata la similitudine di Froude per scalare la potenza della macchina.

In particolare si è constatato che la potenza prodotta dai WEC per il sito in esame è molto bassa e non sarebbe capace di soddisfare da sola le esigenze del Comune di Malfa né tantomeno dell’isola. Per questo motivo, a fronte di questo risultato limitante, si vogliono proporre delle possibili alternative al fine di produrre energia da fonti rinnovabili e ridurre così le forti emissioni di CO<sub>2</sub> dell’isola.

La prima soluzione verte sulla scelta di un sito più idoneo, infatti studi recenti hanno evidenziato altre aree nel Mar Mediterraneo. Come è stato osservato nei grafici della rosa dei venti per i dati offshore l’altezza d’onda significativa è molto più accentuata rispetto a quella in acque basse. Però un’installazione in questo punto non può essere fatta dato che ci sono 2000 m di fondale e questo comporterebbe enormi costi di installazione e manutenzione. Si potrebbe optare in tal caso per un fondale di 100 m e verificare la fattibilità dell’installazione.

Altrimenti si potrebbe optare per un altro sito dato che quello scelto, in base alle osservazioni fatte, è molto limitato dal fetch. Il nuovo sito di installazione potrebbe essere scelto in prossimità della costa NO. In questo caso, però, sarebbe necessario effettuare preliminarmente un’attenta analisi geologica del sito al fine di verificare la stabilità del fondale in cui dovrebbero essere installati gli ancoraggi della struttura galleggiante. La costa Ovest è molto soggetta al fenomeno erosivo.

Una seconda soluzione alternativa o integrativa riguarda l’installazione di una o più turbine eoliche, fisse o galleggianti, oppure ad un servizio integrato che coinvolga anche altre fonti di energia. In tale ambito si potrebbe creare una *Multi-use off-shore platform* cioè un’area di spazio marino in cui è possibile installare WECs, pale eoliche e pannelli fotovoltaici. Al fine di produrre più energia la “piattaforma” potrebbe essere installata a largo, riducendo così anche l’impatto visivo.

Nonostante ciò la *Multi-use platform* non è di facile applicazione sia dal punto di vista economico e gestionale che tecnico-pratico. Infatti si possono riscontrare problemi dovuti all’instabilità degli ancoraggi e del fondale, allo stoccaggio e

stabilizzazione dell'energia prodotta, al funzionamento delle PTO, all'impatto ambientale, alla complessità di installazione, alla manutenzione ecc.. Gli unici impianti di questo tipo sono stati installati nel Nord Europa (primo progetto è stato FP7 LORECCA, di cui alcuni dispositivi non hanno raggiunto il livello di prototipo). Alcuni dispositivi sono ancora in funzione (per esempio il Poseidon) ma i costi di manutenzione sono esorbitanti.

Altra opzione, sicuramente più economica, potrebbe essere l'installazione a terra di un impianto mini-idro e di pannelli fotovoltaici, per esempio installati in ogni abitazione al fine di far fronte al fabbisogno energetico dei singoli.

In conclusione, a fronte di quanto detto, emerge come una condizione quale quella esaminata per il sito di Salina necessiterebbe auspicabilmente di un lavoro di equipe interdisciplinare tra esperti quali ingegneri, economisti, sociologi, ecologi e politici. Così, unendo le "energie" e le competenze di più figure professionali si arriverebbe certamente ad un adeguato prodotto tecnologico ed ecosostenibile: una fonte di energia pulita da cui l'economia così come l'ecosistema delle isole siciliane trarrebbe grande beneficio.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] <http://www.rinnovabili.it/energia/salina-isole-ue-energia-pulita/>
- [2] <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/clean-energy-eu-islands>
- [3] [https://ec.europa.eu/info/news/26-european-islands-launch-clean-energy-transition-2019-feb-18\\_en](https://ec.europa.eu/info/news/26-european-islands-launch-clean-energy-transition-2019-feb-18_en)
- [4] <https://www.euislands.eu/clean-energy-islands>
- [5] <http://www.trapaniok.it/8794/Politica-trapani/salina-isola-sostenibile-the-green-consulting-group-presenta-il-piano-di-azione-nellambito-del-patto-dei-sindaci#.XNAPIK9MTct>
- [6] Regione Siciliana: Assessorato dei Beni Culturali ed Ambientali e della Pubblica Istruzione; Dipartimento Beni Culturali, Ambientali ed Educazione permanente - Piano di gestione UNESCO isole Eolie: Allegati cartografici e Vulcanologia.
- [7] <http://www.portodelleeolie.com/>
- [8] Hann-Ocean Energy Pte Ltd, Drakoo WEC Array proposal for Malfa, Salina Island, Italy, Revision 2 – 9 April 2019
- [9] <https://messina.gazzettadelsud.it/articoli/economia/2019/04/03/quasi-venti-milioni-per-riqualificare-il-porto-di-malfa-a-salina-9c9a61d8-5a5e-4b01-a88d-4daea8586ced/>
- [10] <https://eolienews.blogspot.com/2017/10/malfa-si-lavora-al-potenziamento-del.html>
- [11] <http://www.turismoeolie.com/salina/geologia-salina/>
- [12] <http://marine.copernicus.eu/about-us/about-eu-copernicus/>
- [13] <http://marine.copernicus.eu/faq/cite-cmems-products-cmems-credit/?idpage=169>
- [14] <https://github.com/nctoolbox/nctoolbox>
- [15] <https://worldwide.dhigroup.com/it/ambiente%20marino>
- [16] <http://www.sitr.regione.sicilia.it/?p=573>
- [17] Silvia Bozzi, Giovanni Besio, Giuseppe Passoni, 2018. Wave power technologies for the Mediterranean offshore: Scaling and performance analysis. Coastal Engineering 136, 130–146.

- [18] Silvia Bozzi, Renata Archetti, Giuseppe Passoni, 2014. Wave electricity production in Italian offshore: A preliminary investigation. *Renewable Energy* 62, 407–416.
- [19] <https://www.helifuel.no/helifuel-aasta-hansteen-delivery/>
- [20] Zanuttigh, B. Corso di Idraulica Marittima, DICAM Università di Bologna. (2017/2018).
- [21] Google Earth <https://www.google.it/intl/it/earth/>
- [22] Adrià Moreno Miquel, 2017. Dottorato di ricerca in Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali: Development, analysis and comparison of two concepts for wave energy conversion in the Mediterranean Sea. Alma Mater Studiorum - Università di Bologna.
- [23] Rachele Manili, 2019. Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile: Studio della riflessione ondosa di mezzi porosi a confronto tramite analisi di laboratorio. Alma Mater Studiorum - Università di Bologna.
- [24] <http://www.emodnet.eu/bathymetry>

## Appendice A. Dati delle prove di laboratorio

Tabella 16 - Altezza d'onda significativa in mm misurata dalle sonde per i test sul box.

| Nome test      | H <sub>s,t</sub> | H <sub>s,wq1</sub> | H <sub>s,wq2</sub> | H <sub>s,wq3</sub> | H <sub>s,wq4</sub> | H <sub>s,wq5</sub> | H <sub>s,wq6</sub> |
|----------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| B_D0M1RL060s03 | 18               | 7.3                | 7.4                | 6.6                | 6.6                | 6.5                | 5                  |
| B_D0M1RL060s04 | 24               | 9.6                | 9.8                | 8.8                | 8.7                | 8.8                | 7.3                |
| B_D0M1RL070s03 | 21               | 11                 | 11.9               | 10.2               | 8.6                | 9.5                | 7.9                |
| B_D0M1RL070s04 | 27               | 13                 | 15                 | 12.7               | 10.7               | 11.6               | 10.4               |
| B_D0M1RL080s03 | 24               | 14.6               | 13                 | 15.6               | 13.1               | 11.2               | 13.1               |
| B_D0M1RL080s04 | 30               | 18.1               | 16                 | 19.3               | 16                 | 14.1               | 16                 |
| B_D0M1RL130s04 | 45               | 31                 | 33.6               | 34.5               | 31.9               | 32.2               | 31.3               |
| B_D0M1IL060s03 | 18               | 1.1                | 0.9                | 1.1                | 0.7                | 0.8                | 0.7                |
| B_D0M1IL080s03 | 24               | 2.2                | 2                  | 2.4                | 1.4                | 1.5                | 1.1                |
| B_D0M1IL100s03 | 30               | 4                  | 3.4                | 4.1                | 2.6                | 2.5                | 1.8                |
| B_D0M1IL120s03 | 36               | 5.3                | 4.5                | 6.3                | 4.3                | 4.1                | 3.1                |
| B_D0M1IL120s03 | 40               | 6.6                | 5.4                | 7.4                | 5.3                | 4.9                | 3.8                |
| B_D0M1IL130s03 | 39               | 6.5                | 5.7                | 7.4                | 5.2                | 5.1                | 4                  |
| B_D0M1IL130s03 | 45               | 7.9                | 7.1                | 8.7                | 6.8                | 6.5                | 4.9                |
| B_D0M1IL100s04 | 36               | 5.4                | 4.5                | 5.4                | 3.8                | 3.8                | 2.7                |
| B_D1M1RL060s03 | 18               | 7.3                | 7.2                | 6.7                | 6.3                | 6.4                | 5.3                |
| B_D1M1RL060s04 | 24               | 9.9                | 9.9                | 9.3                | 8.7                | 8.7                | 8                  |
| B_D1M1RL070s03 | 21               | 12.3               | 12                 | 11.4               | 8.6                | 9.3                | 8.2                |
| B_D1M1RL070s04 | 27               | 15.4               | 15.1               | 14.4               | 11.2               | 11.8               | 11                 |
| B_D1M1RL080s03 | 24               | 12.5               | 15.1               | 13.7               | 11.3               | 10.5               | 11.6               |
| B_D1M1RL080s04 | 30               | 15.9               | 18.5               | 17.4               | 14.5               | 13.4               | 14.8               |
| B_D1M1RL090s03 | 27               | 20.5               | 19.2               | 16.8               | 13.3               | 14.9               | 13.7               |
| B_D1M1RL090s04 | 33               | 24.1               | 23                 | 19.4               | 16.3               | 17.7               | 16.6               |
| B_D1M1RL100s03 | 30               | 15.8               | 15.6               | 19.6               | 15                 | 14.3               | 16.1               |
| B_D1M1RL100s04 | 36               | 19.4               | 18.7               | 23.7               | 18.3               | 17.2               | 19.2               |
| B_D1M1RL110s03 | 33               | 19                 | 20.8               | 21.9               | 18.8               | 17.1               | 19.2               |
| B_D1M1RL110s04 | 39               | 22.1               | 24.5               | 26                 | 22.2               | 20.7               | 22.3               |
| B_D0M2RL060s03 | 18               | 8.1                | 6.6                | 7.6                | 6.3                | 6.2                | 4.7                |
| B_D0M2RL060s04 | 24               | 10.9               | 8.9                | 10.2               | 8.3                | 8.2                | 7.5                |
| B_D0M2RL070s03 | 21               | 9.1                | 11.1               | 8.6                | 7.6                | 8                  | 6.2                |
| B_D0M2RL070s04 | 27               | 11.4               | 14.4               | 10.6               | 9.6                | 10                 | 8.9                |
| B_D0M2RL080s03 | 24               | 14.8               | 12.2               | 15.2               | 11.2               | 12                 | 11.7               |
| B_D0M2RL080s04 | 30               | 18                 | 14.7               | 19.1               | 13.9               | 15.5               | 15.4               |
| B_D0M2RL090s03 | 27               | 13.5               | 16                 | 15                 | 11.6               | 13.3               | 13                 |
| B_D0M2RL090s04 | 33               | 16.4               | 19.7               | 17.5               | 14.3               | 15.9               | 16.1               |
| B_D0M2RL100s03 | 30               | 21.4               | 20.5               | 17.7               | 17.5               | 16.1               | 20.5               |
| B_D0M2RL100s04 | 36               | 25.9               | 24.1               | 21.4               | 20.4               | 19.4               | 24.5               |
| B_D0M2RL110s03 | 33               | 25.4               | 22.4               | 22.7               | 21.4               | 21.5               | 22.9               |
| B_D0M2RL110s04 | 39               | 29.7               | 25.4               | 27.1               | 24.5               | 26.1               | 27.7               |
| B_D0M2RL120s03 | 36               | 26.6               | 25.1               | 31.2               | 27.8               | 26.6               | 28.3               |
| B_D0M2RL120s04 | 40               | 29                 | 27.8               | 34                 | 30.3               | 29.6               | 31.2               |
| B_D0M2RL130s03 | 39               | 25.4               | 26.7               | 26.1               | 26                 | 26.5               | 15.2               |
| B_D0M2RL130s04 | 45               | 30.8               | 32.7               | 30.4               | 30.5               | 32.8               | 20.9               |
| B_D0M2IL060s03 | 18               | 1.3                | 1.3                | 1.4                | 1.1                | 1.1                | 0.8                |
| B_D0M2IL080s03 | 24               | 2.6                | 2.3                | 3                  | 2.2                | 2.1                | 1.3                |
| B_D0M2IL100s03 | 30               | 4.6                | 3.7                | 4.5                | 3.3                | 3.2                | 2.5                |
| B_D0M2IL120s03 | 36               | 5.7                | 4.9                | 6.6                | 5.1                | 4.8                | 3.8                |
| B_D0M2IL120s03 | 40               | 6.8                | 5.8                | 7.4                | 6                  | 5.7                | 4.6                |

| Nome test      | H <sub>s</sub> | H <sub>s,wg1</sub> | H <sub>s,wg2</sub> | H <sub>s,wg3</sub> | H <sub>s,wg4</sub> | H <sub>s,wg5</sub> | H <sub>s,wg6</sub> |
|----------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| B_D0M2IL130s03 | 39             | 6.6                | 5.8                | 7.4                | 5.6                | 5.3                | 3.9                |
| B_D0M2IL130s04 | 45             | 8                  | 7.3                | 9.1                | 7.7                | 7                  | 5.3                |
| B_D0M2IL100s04 | 36             | 5.3                | 4.3                | 5.4                | 4.7                | 4.3                | 3.1                |
| B_D2M3R080s03  | 24             | 13                 | 13.4               | 12.9               | 12.6               | 11.6               | 12.7               |
| B_D2M3R090s03  | 27             | 17                 | 16.3               | 16.6               | 15.2               | 16.6               | 15.5               |
| B_D2M3R100s03  | 30             | 17.9               | 18.3               | 19.6               | 19.1               | 17.2               | 19.8               |
| B_D2M3R110s03  | 33             | 21                 | 21.7               | 20.8               | 21.6               | 19.6               | 21.2               |
| B_D2M3R120s03  | 36             | 24.2               | 22                 | 22.9               | 24.9               | 20.3               | 24.1               |
| B_D2M3R130s03  | 39             | 24.8               | 24                 | 24.9               | 25.7               | 23.8               | 23.8               |
| B_D2M3R130s04  | 45             | 30.5               | 29.5               | 30                 | 30.4               | 29.2               | 28.3               |
| B_D2M3IL120s03 | 36             | 6.6                | 5.8                | 7.4                | 5.6                | 5.3                | 3.9                |
| B_D2M3IL130s03 | 39             | 8                  | 7.3                | 9.1                | 7.7                | 7                  | 5.3                |
| B_D2M3IL130s04 | 45             | 5.3                | 4.3                | 5.4                | 4.7                | 4.3                | 3.1                |
| B_D2M3RL130s05 | 60             | 41.9               | 43.2               | 41.3               | 40.3               | 41.4               | 40.4               |
| B_D2M3RL130s06 | 80             | 59.3               | 59.8               | 62.5               | 57.3               | 57.8               | 62.7               |

Tabella 17 - Altezza d'onda significativa in mm misurata dalle sonde per i test sul cilindro.

| Nome test     | H <sub>s</sub> | H <sub>s,wg1</sub> | H <sub>s,wg2</sub> | H <sub>s,wg3</sub> | H <sub>s,wg4</sub> | H <sub>s,wg5</sub> | H <sub>s,wg6</sub> |
|---------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| C_DIM1R060s03 | 18             | 9.1                | 8.2                | 9.1                | 7.3                | 7.1                | 7.7                |
| C_DIM1R060s04 | 24             | 12.1               | 11.4               | 12.1               | 9.8                | 9.9                | 10.4               |
| C_DIM1R070s03 | 21             | 10                 | 10.4               | 10.2               | 9.7                | 9.5                | 9.3                |
| C_DIM1R070s04 | 27             | 12.8               | 13.1               | 13                 | 12.3               | 12.1               | 11.9               |
| C_DIM1R080s03 | 24             | 13.6               | 13.4               | 12.8               | 12                 | 11.8               | 12.1               |
| C_DIM1R080s04 | 30             | 16.8               | 16.5               | 15.8               | 15.1               | 14.8               | 15.4               |
| C_DIM1R090s03 | 27             | 17.6               | 16                 | 17.6               | 15.6               | 16.9               | 16.1               |
| C_DIM1R090s04 | 33             | 21.3               | 19.5               | 21.1               | 19                 | 20.2               | 19.7               |
| C_DIM1R100s03 | 30             | 17.8               | 18.8               | 19.9               | 19                 | 16.9               | 19.9               |
| C_DIM1R100s04 | 36             | 21.1               | 22                 | 23.2               | 22.6               | 20.1               | 23.1               |
| C_DIM1R110s03 | 33             | 19.7               | 20.7               | 19                 | 20.3               | 18.3               | 19.6               |
| C_DIM1R110s04 | 39             | 23.2               | 24.4               | 22.9               | 23.7               | 22                 | 22                 |
| C_DIM1R120s03 | 36             | 22.8               | 20.9               | 21.1               | 23                 | 19.2               | 21.9               |
| C_DIM1R120s04 | 40             | 25                 | 23.2               | 23.1               | 25.1               | 21.2               | 23.6               |
| C_DIM1R130s03 | 39             | 27.1               | 24.3               | 25.4               | 25.1               | 24.4               | 23.5               |
| C_DIM1R130s04 | 45             | 33.5               | 30.6               | 31.2               | 30.4               | 30.5               | 29.2               |
| C_DIM1I120s03 | 36             | 6.2                | 5.2                | 6.4                | 6.2                | 6                  | 4.7                |
| C_DIM1I120s04 | 40             | 7.3                | 6.1                | 7.6                | 7.5                | 7                  | 5.6                |
| C_D2M1R130s04 | 45             | 32.4               | 28.6               | 30.2               | 30.6               | 29.2               | 27                 |
| C_D2M1I120s03 | 36             | 6.4                | 5.4                | 7                  | 6.7                | 6.2                | 4.9                |
| C_D2M1I120s04 | 40             | 7.1                | 6.2                | 7.7                | 7                  | 7                  | 5.9                |
| C_D2M1I130s03 | 39             | 6.9                | 6.7                | 8.3                | 7                  | 7.2                | 5.8                |
| C_D2M1I130s04 | 45             | 8.2                | 8.2                | 10                 | 8.8                | 8.2                | 7                  |

| Nome test     | H <sub>s</sub> | H <sub>s,wg1</sub> | H <sub>s,wg2</sub> | H <sub>s,wg3</sub> | H <sub>s,wg4</sub> | H <sub>s,wg5</sub> | H <sub>s,wg6</sub> |
|---------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| C_D3M3R060s04 | 24             | 11                 | 11.2               | 10.7               | 10.1               | 10                 | 10.5               |
| C_D3M3R070s03 | 21             | 10.9               | 10.1               | 10.9               | 10.7               | 10.1               | 9.9                |
| C_D3M3R070s04 | 27             | 13.7               | 12.7               | 13.9               | 13.8               | 13.1               | 12.6               |
| C_D3M3R080s03 | 24             | 12.3               | 14                 | 12.9               | 11.9               | 14.2               | 11.9               |
| C_D3M3R080s04 | 30             | 15.6               | 17.5               | 16.2               | 15.1               | 17.9               | 15                 |
| C_D3M3R090s03 | 27             | 18.9               | 16.6               | 17                 | 15.7               | 18                 | 16                 |
| C_D3M3R090s04 | 33             | 22.7               | 20                 | 20.5               | 19                 | 21.6               | 19.3               |
| C_D3M3R100s03 | 30             | 17                 | 17.8               | 19.1               | 18.5               | 17.1               | 19.2               |
| C_D3M3R100s04 | 36             | 20.6               | 21.1               | 22.5               | 22.2               | 20.5               | 22.6               |
| C_D3M3R110s03 | 33             | 19.7               | 20.7               | 22.9               | 22.2               | 20.3               | 19.6               |
| C_D3M3R110s04 | 39             | 23.1               | 24.7               | 27.7               | 25.1               | 23.9               | 22.4               |
| C_D3M3R120s03 | 36             | 22.8               | 21.6               | 22.8               | 22.8               | 20.6               | 23.9               |
| C_D3M3R120s04 | 40             | 25                 | 23.9               | 24.9               | 24.8               | 22.8               | 26                 |
| C_D3M3R130s03 | 39             | 25.3               | 23.9               | 24.9               | 26.9               | 23.7               | 21.9               |
| C_D3M3R130s04 | 45             | 31.4               | 29.5               | 29.9               | 32.3               | 29.2               | 26.8               |
| C_D3M3R130s05 | 60             | 48.8               | 47.1               | 40.9               | 43                 | 45.7               | 40.3               |
| C_D3M3R130s06 | 80             | 64.5               | 67.5               | 62.1               | 56.8               | 67.3               | 61.2               |
| C_D3M3I120s03 | 36             | 5.4                | 4.7                | 6                  | 6                  | 5.3                | 4.5                |
| C_D3M3I120s04 | 40             | 6.2                | 5.7                | 6.7                | 6.7                | 6.2                | 5.4                |
| C_D3M3I130s03 | 39             | 5.1                | 6                  | 6.8                | 6.5                | 6.1                | 5.1                |
| C_D3M3I130s04 | 45             | 7.9                | 7.3                | 8.3                | 7.8                | 7.8                | 6.5                |

Tabella 18 - Dati di altezza d'onda per il canale vuoto <sup>[23]</sup>.

| Nome   | H <sub>s</sub> [mm] | L <sub>0</sub> [mm] | H/L    | T <sub>p</sub> [sec] | Reflex coeff. K <sub>r</sub> | H <sub>1/3</sub> [mm] |        |        | H <sub>max</sub> [mm] |        |        |
|--------|---------------------|---------------------|--------|----------------------|------------------------------|-----------------------|--------|--------|-----------------------|--------|--------|
|        |                     |                     |        |                      |                              | sonda1                | sonda2 | sonda3 | sonda1                | sonda2 | sonda3 |
| R01    | 18                  | 600                 | 0.03   | 0.63                 | 16.81%                       | 9.29                  | 9.05   | 10.13  | 10.44                 | 10.62  | 10.28  |
| R01bis | 24                  | 600                 | 0.04   | 0.63                 | 18.28%                       | 14.43                 | 14.82  | 14.64  | 14.74                 | 15.27  | 15.35  |
| R02    | 21                  | 700                 | 0.03   | 0.67                 | 14.68%                       | 13.08                 | 13.42  | 13.05  | 13.41                 | 13.7   | 13.59  |
| R02bis | 27                  | 700                 | 0.0386 | 0.67                 | 14.91%                       | 17.06                 | 17.63  | 17.31  | 17.46                 | 18.17  | 18.08  |
| R03    | 24                  | 800                 | 0.03   | 0.72                 | 13.51%                       | 16.4                  | 16.8   | 16.58  | 16.47                 | 17.05  | 16.75  |
| R03bis | 30                  | 800                 | 0.0375 | 0.72                 | 14.20%                       | 20.75                 | 21.16  | 20.97  | 20.81                 | 21.41  | 21.45  |
| R04    | 27                  | 900                 | 0.03   | 0.765                | 11.66%                       | 20.44                 | 21     | 20.53  | 20.63                 | 21.38  | 20.75  |
| R04bis | 33                  | 900                 | 0.0367 | 0.765                | 10.97%                       | 24.92                 | 25.44  | 25.05  | 25.14                 | 25.83  | 25.34  |
| R05    | 30                  | 1000                | 0.03   | 0.82                 | 10.16%                       | 23.69                 | 24.22  | 23.83  | 24.02                 | 24.51  | 24.17  |
| R05bis | 36                  | 1000                | 0.036  | 0.82                 | 11.48%                       | 28.16                 | 28.58  | 28.61  | 28.54                 | 29.03  | 29.05  |
| R06    | 33                  | 1100                | 0.03   | 0.85                 | 15.30%                       | 26.51                 | 26.88  | 26.63  | 26.74                 | 27.11  | 26.79  |
| R06bis | 39                  | 1100                | 0.0355 | 0.85                 | 14.86%                       | 31.08                 | 31.43  | 31.33  | 31.38                 | 31.64  | 31.62  |
| R07    | 36                  | 1200                | 0.03   | 0.9                  | 12.09%                       | 28.58                 | 28.89  | 28.37  | 29.14                 | 29.04  | 28.75  |
| R07bis | 40                  | 1200                | 0.0333 | 0.9                  | 11.77%                       | 31.76                 | 31.86  | 31.73  | 32.38                 | 32.19  | 31.92  |
| R08    | 39                  | 1300                | 0.03   | 0.94                 | 16.18%                       | 32.71                 | 33.43  | 32.74  | 33.83                 | 34.76  | 33.13  |
| R08bis | 45                  | 1300                | 0.0346 | 0.94                 | 15.58%                       | 39.38                 | 40.5   | 39.55  | 40.73                 | 42.05  | 39.94  |

## Appendice B. Matrici di potenza

### B.1 Matrici di potenza originarie fornite dal costruttore<sup>[17]</sup>.

|        |     | Tp (s) |     |     |     |     |     |     |     |     |    |
|--------|-----|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
|        |     | 6      | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 17 |
| Hs (m) | 1   | 0      | 8   | 11  | 12  | 11  | 10  | 8   | 7   | 0   | 0  |
|        | 1.5 | 13     | 17  | 25  | 27  | 26  | 23  | 19  | 15  | 12  | 7  |
|        | 2   | 24     | 30  | 44  | 49  | 47  | 41  | 34  | 28  | 23  | 12 |
|        | 2.5 | 37     | 47  | 69  | 77  | 73  | 64  | 54  | 43  | 36  | 19 |
|        | 3   | 54     | 68  | 99  | 111 | 106 | 92  | 77  | 63  | 51  | 27 |
|        | 3.5 | 0      | 93  | 135 | 152 | 144 | 126 | 105 | 86  | 70  | 38 |
|        | 4   | 0      | 122 | 176 | 198 | 188 | 164 | 137 | 112 | 91  | 49 |
|        | 4.5 | 0      | 0   | 223 | 250 | 239 | 208 | 173 | 142 | 115 | 62 |
|        | 5   | 0      | 0   | 250 | 250 | 250 | 250 | 214 | 175 | 142 | 77 |
|        | 5.5 | 0      | 0   | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 211 | 172 | 92 |

Figura 62 - Matrice di potenza dell'AquaBuOY (kW).

|        |     | Tp (s) |     |     |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------|-----|--------|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|        |     | 4      | 5   | 6   | 7    | 8    | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  |
| Hs (m) | 1   | 19     | 29  | 47  | 57   | 52   | 37  | 29  | 20  | 17  | 13  | 9   | 7   | 7   |
|        | 1.5 | 42     | 63  | 92  | 111  | 109  | 65  | 56  | 38  | 29  | 22  | 19  | 13  | 11  |
|        | 2   | 66     | 99  | 151 | 201  | 165  | 105 | 85  | 59  | 52  | 41  | 29  | 24  | 19  |
|        | 2.5 | 0      | 160 | 242 | 262  | 226  | 166 | 118 | 83  | 70  | 57  | 39  | 29  | 26  |
|        | 3   | 0      | 213 | 319 | 372  | 327  | 211 | 152 | 116 | 94  | 75  | 66  | 45  | 42  |
|        | 3.5 | 0      | 0   | 436 | 503  | 408  | 293 | 203 | 148 | 115 | 93  | 75  | 58  | 44  |
|        | 4   | 0      | 0   | 554 | 540  | 521  | 355 | 261 | 192 | 144 | 123 | 84  | 81  | 56  |
|        | 4.5 | 0      | 0   | 645 | 746  | 587  | 379 | 302 | 236 | 190 | 154 | 106 | 90  | 74  |
|        | 5   | 0      | 0   | 796 | 926  | 695  | 486 | 341 | 287 | 211 | 168 | 136 | 111 | 94  |
|        | 5.5 | 0      | 0   | 0   | 955  | 808  | 603 | 430 | 343 | 231 | 201 | 150 | 120 | 97  |
|        | 6   | 0      | 0   | 0   | 1161 | 957  | 642 | 481 | 329 | 289 | 212 | 172 | 146 | 111 |
|        | 6.5 | 0      | 0   | 0   | 1476 | 1039 | 702 | 488 | 397 | 312 | 237 | 204 | 153 | 120 |
|        | 7   | 0      | 0   | 0   | 1665 | 1197 | 821 | 612 | 466 | 385 | 252 | 223 | 181 | 146 |

Figura 63 - Matrice di potenza del Langlee (kW).

|        |     | Tp (s) |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------|-----|--------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|        |     | 6      | 7   | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   |
| Hs (m) | 1   | 8      | 17  | 27   | 42   | 56   | 59   | 52   | 44   | 40   | 38   | 40   | 38   | 30   |
|        | 1.5 | 17     | 39  | 61   | 96   | 126  | 132  | 117  | 99   | 89   | 87   | 89   | 85   | 66   |
|        | 2   | 30     | 69  | 108  | 170  | 224  | 235  | 208  | 177  | 159  | 154  | 159  | 151  | 118  |
|        | 2.5 | 47     | 108 | 169  | 266  | 350  | 368  | 324  | 276  | 249  | 241  | 248  | 236  | 185  |
|        | 3   | 68     | 155 | 244  | 383  | 504  | 530  | 467  | 398  | 358  | 347  | 357  | 340  | 266  |
|        | 3.5 | 93     | 212 | 332  | 521  | 686  | 721  | 636  | 542  | 487  | 472  | 486  | 463  | 362  |
|        | 4   | 121    | 276 | 433  | 680  | 896  | 942  | 831  | 708  | 636  | 616  | 634  | 605  | 473  |
|        | 4.5 | 154    | 350 | 548  | 861  | 1130 | 1190 | 1050 | 896  | 805  | 780  | 803  | 765  | 599  |
|        | 5   | 190    | 432 | 677  | 1060 | 1400 | 1470 | 1300 | 1110 | 994  | 963  | 991  | 945  | 739  |
|        | 5.5 | 0      | 523 | 819  | 1290 | 1690 | 1780 | 1570 | 1340 | 1200 | 1170 | 1200 | 1140 | 894  |
|        | 6   | 0      | 622 | 975  | 1530 | 2020 | 2120 | 1870 | 1590 | 1430 | 1390 | 1430 | 1360 | 1060 |
|        | 6.5 | 0      | 730 | 1140 | 1800 | 2370 | 2490 | 2190 | 1870 | 1680 | 1630 | 1670 | 1600 | 1250 |
|        | 7   | 0      | 847 | 1330 | 2080 | 2750 | 2880 | 2540 | 2170 | 1950 | 1890 | 1940 | 1850 | 1450 |

Figura 64 - Matrice di potenza del OE buoy (kW).

|        |     | Te (s) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |     |      |     |      |     |     |
|--------|-----|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|------|-----|-----|
|        |     | 5      | 5.5 | 6   | 6.5 | 7   | 7.5 | 8   | 8.5 | 9   | 9.5 | 10  | 10.5 | 11  | 11.5 | 12  | 12.5 | 13  |     |
| Hs (m) | 1   | 0      | 22  | 29  | 34  | 37  | 38  | 38  | 37  | 35  | 32  | 29  | 26   | 23  | 21   | 0   | 0    | 0   |     |
|        | 1.5 | 32     | 50  | 65  | 76  | 83  | 86  | 86  | 83  | 78  | 72  | 65  | 59   | 53  | 47   | 42  | 37   | 33  |     |
|        | 2   | 57     | 88  | 115 | 136 | 148 | 153 | 152 | 147 | 138 | 127 | 116 | 104  | 93  | 83   | 74  | 66   | 59  |     |
|        | 2.5 | 89     | 138 | 180 | 212 | 231 | 238 | 238 | 230 | 216 | 199 | 181 | 163  | 146 | 130  | 116 | 103  | 92  |     |
|        | 3   | 129    | 198 | 260 | 305 | 332 | 340 | 332 | 315 | 292 | 266 | 240 | 219  | 210 | 188  | 167 | 149  | 132 |     |
|        | 3.5 | 0      | 270 | 354 | 415 | 438 | 440 | 424 | 404 | 377 | 362 | 326 | 292  | 260 | 230  | 215 | 202  | 180 |     |
|        | 4   | 0      | 0   | 462 | 502 | 540 | 546 | 530 | 499 | 475 | 429 | 384 | 366  | 339 | 301  | 267 | 237  | 213 |     |
|        | 4.5 | 0      | 0   | 544 | 633 | 642 | 648 | 628 | 590 | 562 | 528 | 473 | 432  | 382 | 356  | 338 | 300  | 266 |     |
|        | 5   | 0      | 0   | 0   | 739 | 726 | 731 | 707 | 687 | 670 | 607 | 557 | 521  | 472 | 417  | 369 | 348  | 328 |     |
|        | 5.5 | 0      | 0   | 0   | 750 | 750 | 750 | 750 | 750 | 737 | 667 | 658 | 586  | 530 | 496  | 446 | 395  | 355 |     |
|        | 6   | 0      | 0   | 0   | 0   | 750 | 750 | 750 | 750 | 750 | 750 | 711 | 633  | 619 | 558  | 512 | 470  | 415 |     |
|        | 6.5 | 0      | 0   | 0   | 0   | 750 | 750 | 750 | 750 | 750 | 750 | 750 | 743  | 658 | 621  | 579 | 512  | 481 |     |
|        | 7   | 0      | 0   | 0   | 0   | 0   | 750 | 750 | 750 | 750 | 750 | 750 | 750  | 750 | 750  | 676 | 613  | 584 | 525 |
|        | 7.5 | 0      | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 750 | 750 | 750 | 750 | 750 | 750  | 750 | 750  | 750 | 686  | 622 | 593 |
|        | 8   | 0      | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 750 | 750 | 750 | 750 | 750  | 750 | 750  | 750 | 750  | 690 | 625 |

Figura 65 - Matrice di potenza del Pelamis (kW).

|        |     | Tp (s) |     |     |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |
|--------|-----|--------|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
|        |     | 4      | 5   | 6   | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  |
| Hs (m) | 1   | 180    | 166 | 153 | 171  | 125  | 87   | 72   | 65   | 85  | 85  | 37  | 29  | 16  |
|        | 1.5 | 223    | 195 | 157 | 148  | 261  | 192  | 223  | 139  | 155 | 155 | 74  | 67  | 46  |
|        | 2   | 0      | 0   | 214 | 227  | 396  | 335  | 237  | 235  | 172 | 138 | 115 | 104 | 70  |
|        | 2.5 | 0      | 0   | 0   | 440  | 598  | 514  | 379  | 342  | 204 | 169 | 142 | 128 | 95  |
|        | 3   | 0      | 0   | 0   | 681  | 801  | 735  | 594  | 486  | 199 | 174 | 151 | 134 | 121 |
|        | 3.5 | 0      | 0   | 0   | 904  | 1035 | 949  | 788  | 617  | 239 | 209 | 183 | 164 | 146 |
|        | 4   | 0      | 0   | 0   | 1131 | 1269 | 1163 | 982  | 743  | 285 | 248 | 216 | 195 | 175 |
|        | 4.5 | 0      | 0   | 0   | 1358 | 1488 | 1374 | 1187 | 869  | 330 | 287 | 250 | 225 | 201 |
|        | 5   | 0      | 0   | 0   | 1585 | 1712 | 1585 | 1392 | 988  | 380 | 334 | 285 | 263 | 226 |
|        | 5.5 | 0      | 0   | 0   | 1812 | 1937 | 1798 | 2138 | 1107 | 429 | 381 | 323 | 301 | 261 |
|        | 6   | 0      | 0   | 0   | 2040 | 2162 | 2010 | 2884 | 1234 | 439 | 416 | 361 | 336 | 295 |
|        | 6.5 | 0      | 0   | 0   | 2267 | 2386 | 2221 | 3143 | 1360 | 449 | 450 | 406 | 372 | 329 |
|        | 7   | 0      | 0   | 0   | 2494 | 2611 | 2433 | 3619 | 1483 | 506 | 464 | 451 | 408 | 363 |

Figura 66 - Matrice di potenza del Pontoon (kW).

|        |      | Tp (s) |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------|------|--------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|        |      | 4.5    | 5.5 | 6.5 | 7.5  | 8.5  | 9.5  | 10.5 | 11.5 | 12.5 | 13.5 | 14.5 | 15.5 | 16.5 |
| Hs (m) | 0.75 | 4      | 13  | 24  | 31   | 35   | 35   | 34   | 31   | 30   | 31   | 32   | 29   | 16   |
|        | 1.25 | 0      | 37  | 66  | 87   | 98   | 99   | 93   | 87   | 84   | 86   | 88   | 81   | 45   |
|        | 1.75 | 0      | 73  | 129 | 171  | 192  | 193  | 183  | 171  | 165  | 168  | 172  | 158  | 88   |
|        | 2.25 | 0      | 120 | 214 | 283  | 317  | 319  | 302  | 283  | 273  | 278  | 285  | 261  | 146  |
|        | 2.75 | 0      | 0   | 546 | 423  | 474  | 477  | 452  | 422  | 408  | 415  | 426  | 391  | 218  |
|        | 3.25 | 0      | 0   | 0   | 591  | 662  | 666  | 631  | 590  | 570  | 580  | 595  | 545  | 305  |
|        | 3.75 | 0      | 0   | 0   | 787  | 881  | 887  | 840  | 785  | 759  | 772  | 792  | 726  | 406  |
|        | 4.25 | 0      | 0   | 0   | 1011 | 1132 | 1139 | 1079 | 1008 | 974  | 991  | 1017 | 933  | 0    |
|        | 4.75 | 0      | 0   | 0   | 0    | 1414 | 1423 | 1348 | 1259 | 1217 | 1238 | 1270 | 1165 | 0    |
|        | 5.25 | 0      | 0   | 0   | 0    | 1992 | 1739 | 1646 | 1538 | 1487 | 1512 | 1551 | 1423 | 0    |
|        | 5.75 | 0      | 0   | 0   | 0    | 0    | 2085 | 1975 | 1845 | 1784 | 1814 | 1861 | 1707 | 0    |
|        | 6.25 | 0      | 0   | 0   | 0    | 0    | 2085 | 2333 | 2180 | 2107 | 2143 | 2199 | 2017 | 0    |
|        | 6.75 | 0      | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 2721 | 2543 | 2458 | 2500 | 2565 | 2353 | 0    |
|        | 7.25 | 0      | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 3139 | 2934 | 2835 | 2884 | 2959 | 2714 | 0    |
|        | 7.75 | 0      | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 3587 | 3353 | 3240 | 3295 | 3381 | 3102 | 0    |

Figura 67 - Matrice di potenza del SeaPower (kW).

|        |     | Tp (s) |    |     |     |      |      |      |      |      |     |     |     |     |  |
|--------|-----|--------|----|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|--|
|        |     | 4      | 5  | 6   | 7   | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13  | 14  | 15  | 16  |  |
| Hs (m) | 1   | 6      | 11 | 19  | 25  | 30   | 44   | 50   | 53   | 44   | 34  | 22  | 20  | 17  |  |
|        | 1.5 | 13     | 25 | 43  | 55  | 68   | 90   | 102  | 92   | 91   | 66  | 65  | 45  | 37  |  |
|        | 2   | 24     | 45 | 65  | 100 | 121  | 153  | 175  | 151  | 122  | 126 | 87  | 61  | 58  |  |
|        | 2.5 | 0      | 65 | 104 | 141 | 191  | 179  | 243  | 255  | 190  | 181 | 135 | 99  | 83  |  |
|        | 3   | 0      | 96 | 137 | 205 | 244  | 357  | 293  | 353  | 260  | 248 | 184 | 137 | 120 |  |
|        | 3.5 | 0      | 0  | 192 | 254 | 291  | 431  | 385  | 424  | 314  | 285 | 239 | 222 | 172 |  |
|        | 4   | 0      | 0  | 256 | 366 | 403  | 551  | 536  | 531  | 473  | 420 | 289 | 268 | 179 |  |
|        | 4.5 | 0      | 0  | 327 | 418 | 574  | 678  | 708  | 665  | 509  | 415 | 386 | 244 | 249 |  |
|        | 5   | 0      | 0  | 358 | 514 | 658  | 824  | 828  | 618  | 638  | 512 | 452 | 384 | 333 |  |
|        | 5.5 | 0      | 0  | 0   | 610 | 774  | 880  | 936  | 905  | 805  | 603 | 456 | 397 | 311 |  |
|        | 6   | 0      | 0  | 0   | 711 | 952  | 974  | 1000 | 838  | 886  | 648 | 501 | 503 | 396 |  |
|        | 6.5 | 0      | 0  | 0   | 788 | 1000 | 1000 | 1000 | 979  | 1000 | 727 | 577 | 435 | 424 |  |
|        | 7   | 0      | 0  | 0   | 781 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 958 | 748 | 574 | 472 |  |

Figura 68 - Matrice di potenza del Wavebob (kW).

Tabella 19 - Legenda a colori della variabilità delle potenze.

|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| $P_{max}$                       | Dark red     |
| $0.8 * P_{max} - P_{max}$       | Red          |
| $0.6 * P_{max} - 0.8 * P_{max}$ | Dark orange  |
| $0.4 * P_{max} - 0.6 * P_{max}$ | Orange       |
| $0.2 * P_{max} - 0.4 * P_{max}$ | Yellow       |
| $0 - 0.2 * P_{max}$             | Light yellow |
| 0                               | White        |

## B.2 Matrici di potenza per i dispositivi dimensionati nel Mar Mediterraneo.

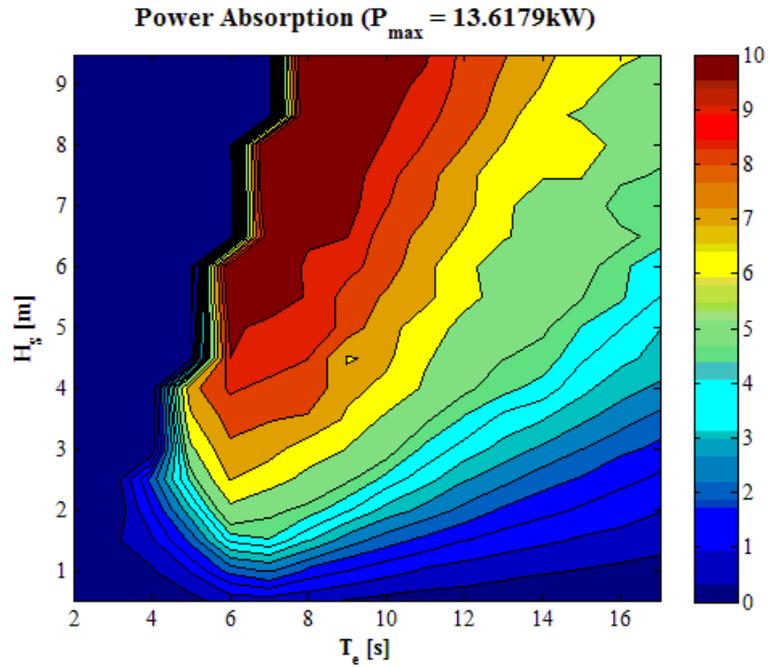


Figura 69 - Matrice di potenza del HPA-LG seabed (kW) Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.

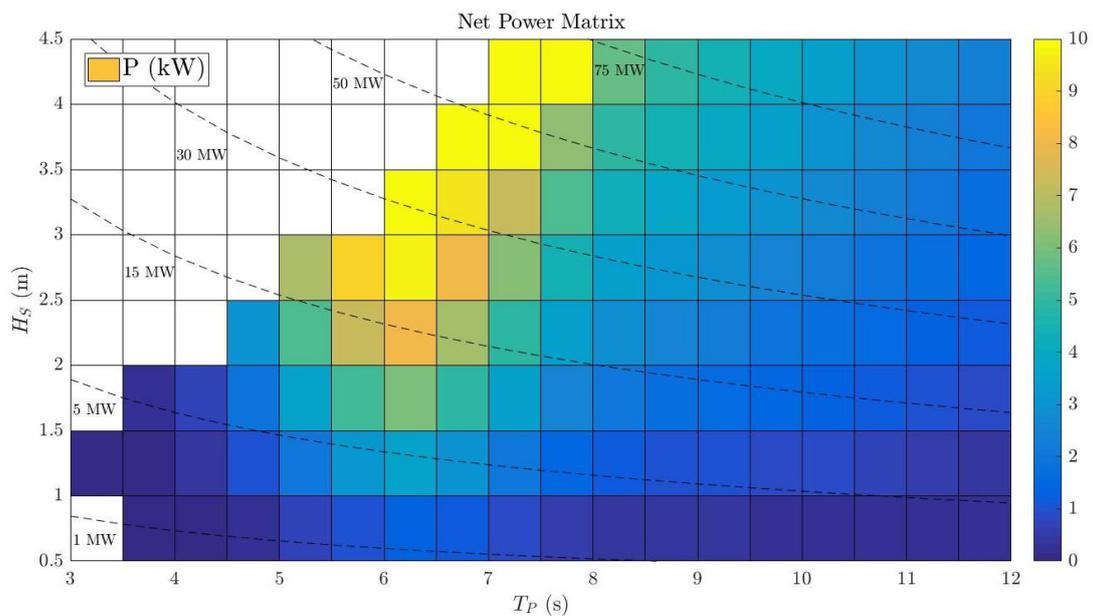


Figura 70 - Matrice di potenza del moonWEC (kW) Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.