



Ricerca di Sistema elettrico

Progettazione della campagna sperimentale

F. Pilato, B. Paduano, S. Sirigu, G. Bracco, G. Mattiazzo



**Politecnico
di Torino**

Report RdS/PAR2020/109

PROGETTAZIONE DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE

F. Pilato, B. Paduano, S. Sirigu, G. Bracco, G. Mattiazzo

Marzo 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: 1.8 Energia elettrica dal mare

Work package: (*Energia elettrica dal mare*)

Linea di attività: Progettazione della campagna sperimentale (LA1.14)

Responsabile del Progetto: Gianmaria Sannino ENEA

Responsabile del Work package: Gianmaria Sannino ENEA

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

Responsabile scientifico ENEA: Gianmaria Sannino

Responsabile scientifico Politecnico di Torino: Giuliana Mattiazzo

Sommario

INTRODUZIONE	4
1 CENNI SU CONTORNO AMBIENTALE E PIANO PROVE.....	5
2 SCALATURA CON COEFFICIENTI DI FROUDE.....	8
2.1 SCALATURA CONTORNO AMBIENTALE E SCELTA DEL FATTORE DI SCALA	9
2.2 SCALATURA SCAFO E CAD	9
2.3 DESCRIZIONE SISTEMA DI MOORING	11
2.4 SCALATURE.....	15
3 SISTEMA D'ACQUISIZIONE.....	16
APPENDICE A	18
APPENDICE B	21
APPENDICE C	25
BIBLIOGRAFIA	34

Introduzione

I Wave Energy Converter necessitano di uno studio approfondito riguardante il comportamento dello scafo in diverse condizioni meteomarine. Per questo vengono utilizzati diversi strumenti scelti in accordo con il livello di avanzamento del progetto. Per un'analisi preliminare del design vengono generalmente utilizzate teorie lineari su codici MATLAB che consentono di testare rapidamente diverse configurazioni. Per lo studio della dinamica viene invece utilizzato il software OrcaFlex, che consente di determinare i moti dello scafo e le tensioni sulle linee d'ormeggio. Quando scafo ed ormeggio sono definiti, il modello viene implementato su software CFD al fine di determinare le pressioni idrodinamiche generate sullo scafo e procedere con il dimensionamento del componente. Il ciclo di progettazione si chiude con dei test sperimentali che fanno da connettore tra quanto viene determinato numericamente e quanto effettivamente la realtà restituisce.

Le prove sperimentali sono uno dei tasselli fondamentali della progettazione ingegneristica e, con il passare degli anni e con lo sviluppo tecnologico, esse sono diventate sempre più prestanti e precise; tutto ciò ha portato inevitabilmente a un incremento della loro complessità, con ripercussioni importanti anche dal punto di vista economico e temporale. Per tal motivo, è fondamentale anteporre alla sperimentazione una fase di pianificazione, progettazione e gestione del lavoro stesso. In tal senso ci si è mossi in questa fase del progetto, facendo da trait d'union tra i vari reparti del gruppo di ricerca, con lo scopo di fornire in output un protocollo da seguire per l'effettuazione di una campagna sperimentale in onda estrema.

In fase di programmazione, è stata eseguita un'analisi del contorno ambientale, utile per la determinazione delle condizioni estreme di stato di mare, con onde che hanno un periodo di ritorno di 100 anni, e su di esso sono state eseguite svariate simulazioni numeriche, per indagare sul comportamento del WEC dal punto di vista dinamico, fluidodinamico e strutturale.

I risultati sul contorno ambientale sono stati usati come parametri vincolanti per la scelta della vasca prova; invece, i risultati numerici ottenuti rappresentano i valori che le prove sperimentali dovranno eventualmente confermare e su di essi si è basata la scelta degli strumenti di misurazione e del loro fondo scala.

Il passo successivo è stato, quindi, la ricerca di vasche navali adatte a test sperimentali che prevedessero la generazione di onde, mettendo a confronto la loro capacità di generare determinati tipi di onde con quelle desiderate per l'esperimento, imposte dai valori indicati dal contorno ambientale.

La scelta finale è ricaduta sulla vasca navale dell'Università Federico II di Napoli ed è stato stabilito un rapporto di scala pari a 1:25, compatibile con riproducibilità delle onde estreme da parte dell'ondogeno e allo stesso tempo buon compromesso fra dimensioni della vasca e del sistema di ormeggio. Il rapporto di scala ha quindi permesso di passare alla progettazione del prototipo da portare in vasca prova e del suo sistema d'ormeggio, al disegno del CAD per il tuning dei parametri inerziali (ottenuti tramite scalatura del sistema al vero secondo la teoria di Froude), e alla definizione dell'architettura del sistema d'acquisizione; quest'ultimo prevede un sistema on-board composto da un controllore alimentato a batterie, un router wifi per la trasmissione dei dati, trasduttori per la misurazione delle pressioni idrodinamiche agenti sullo scafo e celle di carico per misurare le forze agenti sugli ormeggi; infine, si è curata la gestione della realizzazione dell'unità in un'officina specializzata. In parallelo è stato sviluppato un sistema in ambiente Labview per l'acquisizione dei sensori ed effettuata la caratterizzazione e taratura di questi ultimi.

1 Cenni su contorno ambientale e piano prove

Come visto nel deliverable precedente [7], è stata eseguita un’analisi della risorsa ondosa nel sito marino a largo delle coste dell’isola di Pantelleria, che ha permesso di stabilire il contorno ambientale in cui muoversi per qualsiasi tipo di studio idrodinamico sull’unità PeWEC.

Prima di giungere alla campagna sperimentale, la cui progettazione è obiettivo del presente documento, lo studio progettuale ha attraversato diverse fasi:

- Come da normativa [1], sono stati determinati i contorni ambientali per l’individuazione degli stati di mare estremi.
- Tramite software Orcaflex (software che sfrutta modelli idrodinamici BEM-based con ormeggio dinamico) e tramite procedimento iterativo è stato progettato e identificato il sistema di ormeggio.
- Una volta identificato ormeggio, si è implementato il tutto in ambiente CFD (Computational Fluid Dynamics, con software star CCM+) per la determinazione delle pressioni agenti sullo scafo.

A completamento di quanto fatto, la campagna sperimentale avrà come principale obiettivo la validazione dei modelli numerici sopracitati: verrà eseguita una verifica sperimentale della risposta dinamica, delle pressioni d’onda generate sullo scafo e delle forze lungo la catena d’ormeggio.

PROGRAMMA CAMPAGNA SPERIMENTALE PEWEC	
FASE 1	Setup sperimentale Durata: 5 giorni
Arrivo e preparazione materiale Calibrazione inerzie/masse al banco inerziale Installazione del virtual seabed Calibrazione dei sensori (wave gauges, QualSys e celle di carico) Calibrazione vasca (onde senza dispositivo per valutare qualità ondogeno)	
FASE 2	Prove statiche e risposta in frequenza Durata: 3 giorni
Caratterizzazione statica ormeggio Free decay scafo (senza ormeggio) per individuare periodo risonanza scafo a beccheggio e rollio (valutare i coefficienti di attrito viscoso) Free decay (con ormeggio) Risposta in onda regolare (10 onde circa) Onda irregolare in punto di progetto	
FASE 3	PROVA IN ONDA ESTREMA Durata: 7 giorni
Onda estrema dei 100 anni per 0° Onda estrema dei 100 anni per 45° Onda estrema dei 100 anni per 90° Onda dei 100 anni, corrispondente al periodo di risonanza per 0° Onda dei 100 anni, corrispondente al periodo di risonanza per 45° Onda dei 100 anni, corrispondente al periodo di risonanza per 90°	
Tempo necessario per il singolo test, min 36 Test per ogni onda: 5/10	

FIGURA 1-1 – PROGRAMMA CAMPAGNA SPERIMENTALE

Vista la complementarità tra simulazioni numeriche e test sperimentali, si ha la necessita di mantenere il piano di prove sperimentali quanto più aderente possibile a quelli previsti a livello numerico: nella fattispecie, si è preso come principale riferimento, il piano di simulazioni fluidodinamiche eseguite con il software Star-CCM+, descritto nel deliverable precedente [7]. In tabella 1.1 è possibile vedere le due tipologie di onde

scelte: in vasca prova verranno simulate l'onda centenaria con periodo energetico, T_e , pari al periodo di risonanza a beccheggio del dispositivo e quella con l'altezza significativa, H_s , massima, entrambe per tre diverse direzioni d'onda. Nella realtà, i casi estremi sono compresi esattamente tra questi due tipi di onde. In particolare, un'onda con periodo pari a quello di risonanza produce le pressioni più gravose sullo scafo. Il caso con altezza significativa massima invece, produce le tensioni massime sulle linee dell'ormeggio [7]. Tale analisi non è prevista dalla normativa DNV rp-c205 [1], poiché essa non prende in considerazione sistemi che lavorano a risonanza.

Tipo d'onda	Altezza dell'onda, H_s [m]	Periodo dell'onda, T_e [s]	Direzioni dell'onda
Onda estrema con periodo di ritorno dei 100 anni	7.6	11.6	0°, 45°, 90°
Onda dei 100 anni, corrispondente al periodo di risonanza	5.2	6	0°, 45°, 90°

TABELLA 1-1 – ONDE SELEZIONATE PER LA CAMPAGNA SPERIMENTALE

Seguendo le linee guida indicate dalle normative IEC 62600-2 [5] e DNV rp-c205 [1], si è giunti alla determinazione del programma in figura 1.1, che prevede, per l'intera campagna, un periodo complessivo di 3 settimane circa.

1.1 Descrizione della vasca prova

La scelta della vasca prova è un aspetto molto importante, che va influenzare, nella loro totalità, le scelte relative all'intera campagna di sperimentazione. In particolare, il vincolo riguarda i limiti della struttura vasca (e della relativa strumentazione) nel riprodurre un determinato tipo di condizione ondosa, in termini di periodo e altezza dell'onda. La scelta della scala di riferimento del prototipo da testare è fortemente connessa a quanto detto: infatti, l'onda da simulare non è libera, ma imposta dai valori misurati nella zona marina di nostro interesse; questo si traduce in un limite massimo nella scala disponibile per riprodurre il fenomeno in esame.

La scelta è ricaduta sulla Vasca Navale dell'Università Federico II di Napoli, opzione migliore compatibilmente con le prove che devono essere condotte. Dai dati fornitici dalla stessa Università, la vasca presenta le seguenti caratteristiche geometriche tabella 1.2:

Lunghezza	[m]	147
Larghezza	[m]	9
Profondità	[m]	4,2

TABELLA 1-2 - CARATTERISTICHE GEOMETRICHE VASCA PROVA

Ad un'estremità della vasca è installato un sistema in grado di generare onde composto da otto paratie piane oscillanti con singola cerniera alte 1.5 m, con corsa massima di $\pm 20^\circ$, azionate da motori elettrici [6].

Inoltre, all'estremità opposta della vasca rispetto al posizionamento dell'ondogeno, è presente spiaggia assorbitrice necessaria per ridurre e smorzare l'onda riflessa [6].

Sempre dai dati fornitici dall'Università di Napoli, il suddetto sistema è in grado di generare onde regolari e irregolari, con le combinazioni di ampiezza, lunghezza d'onda e periodo elencate in tabella 1.3:

Frequenza	λ	Alim	Periodo
[Hz]	[m]	[m]	[s]
0,25	24,97	0,150	4,00
0,36	12,04	0,270	2,78
0,42	8,85	0,270	2,38
0,50	6,24	0,270	2,00
0,56	4,98	0,250	1,79
0,62	4,06	0,235	1,61
0,75	2,77	0,170	1,33
0,88	2,02	0,125	1,14
1,00	1,56	0,100	1,00
1,15	1,18	0,080	0,87
1,25	1,00	0,080	0,80

TABELLA 1.3 - ONDE CHE LA VASCA NAVALE È IN GRADO DI GENERARE

2 Scalatura con coefficienti di Froude

Per effettuare la prova sperimentale è stata effettuata una scalatura delle varie grandezze seguendo la legge di scalatura idrodinamica di Froude, utilizzando i coefficienti forniti dalla normativa [5], elencati nella seguente tabella:

Caratteristica	Parametro	Froude scaling
Geometrica	Lunghezza	λ
	Area	λ^2
	Volume	λ^3
Ambiente	Lunghezza e altezza d'onda	λ
	Periodo dell'onda	$\lambda^{0.5}$
	Frequenza dell'onda	$\lambda^{-0.5}$
	Densità di potenza (per unità di lunghezza)	$\lambda^{2.5}$
Cinematica	Spostamento traslazionale	λ
	Spostamento angolare	1
	Velocità traslazionale	$\lambda^{0.5}$
	Velocità angolare	$\lambda^{-0.5}$
	Accelerazione traslazionale	1
	Accelerazione angolare	λ^{-1}
	Portata in volume	$\lambda^{2.5}$
Dinamica	Massa	λ^3
	Forza	λ^3
	Coppia	λ^4
	Pressione	λ
	Potenza	$\lambda^{3.5}$
	Rigidezza traslazionale	λ^2
	Rigidezza angolare	λ^4
	Smorzamento traslazionale	$\lambda^{2.5}$
	Smorzamento angolare	$\lambda^{4.5}$

TABELLA 2.1 – COEFFICIENTI DI FROUDE

La formula generale per effettuare le suddette scalature è la seguente [8]:

$$Grandezza\ scalata = \frac{Grandezza\ fullscale}{Fattore\ di\ scala^{Coeff.\ Froude}}$$

In ambito fluidodinamico, si sceglie questo metodo (Froude e non Reynolds) quando, come nel presente esperimento, gli effetti inerziali sono preponderanti rispetto a quelli viscosi.

2.1 Scalatura contorno ambientale e scelta del fattore di scala

La scelta del rapporto di scala è stata eseguita per tentativi: si è proceduto innanzitutto con la riscalatura del contorno ambientale secondo i rapporti indicati in tabella:

VALORI AL VERO							
		Onda massima 100 anni			Onda 100 anni con periodo di risonanza		
Scala		H _s	T _m	Durata prova	H _{onda}	T _m	Durata prova
		[m]	[s]	[s]	[m]	[s]	[s]
	1:1	7,6	11,6	3600	8	6	1800

		Onda massima 100 anni			Onda 100 anni con periodo di risonanza		
Scala		Ampiezza	T _m	Durata prova	Ampiezza	T _m	Durata prova
		[m]	[s]	[s]	[m]	[s]	[s]
	1: 1	3,95	11,60	3600	4,000	6,00	1800
	1: 20	0,198	2,59	805	0,200	1,34	402
	1: 25	0,158	2,32	720	0,160	1,20	360
	1: 30	0,132	2,12	657	0,133	1,10	329
	1: 35	0,113	1,96	609	0,114	1,01	304

TABELLA 2.2 – SCALATURA ONDE

Mettendo a confronto i dati tecnici della vasca prova con quelli presenti nella precedente tabella e dopo un confronto con i tecnici e gli ingegneri dell'Università Federico II, che affiancheranno, durante i test, il team del Politecnico di Torino, incaricato per la campagna sperimentale, la scelta è ricaduta su un rapporto di scala pari a 1:25. Infatti, in base al contorno ambientale verificato nel sito marino di Pantelleria, la vasca sarebbe in grado di effettuare riproduzioni in scala delle onde fino a 1:15; un limite maggiore è stato riscontrato invece nella capacità della spiaggia assorbitrice di smorzare le onde e di conseguenza limitare le onde riflesse.

2.2 Scalatura scafo e CAD

Effettuata la scalatura del contorno ambientale, si è passati alla scalatura delle principali proprietà geometriche e fisiche al vero del sistema PeWEC. Il layout di quest'ultimo è stato individuato tramite ottimizzazione tecno-economica [9]. In tabella 2.3 si possono trovare i risultati ottenuti.

Quest'ultima attività è stata il punto di partenza nel processo di design per la generazione del CAD del prototipo e delle successive tavole. Tali tavole sono state poi inviate all'officina specializzata per la produzione e assemblaggio dei singoli componenti.

Questa fase ha presentato diverse problematiche, a causa della coesistenza di diverse esigenze di diversa natura da soddisfare contemporaneamente, giungendo al miglior compromesso possibile: è evidente che la progettazione di questi sistemi complessi e innovativi presuppone delle fasi di iterazione.

Prima di adesso, sono state effettuate altre due campagne sperimentali, in scala 1:45 [11] e 1:12 [10]: la prima serviva per dimostrare il funzionamento del concept, mentre la scala maggiore serviva per valutare le prestazioni operative e la validazione del modello dinamico. La nuova campagna sperimentale, invece, si focalizzerà sulla valutazione del comportamento del sistema in condizioni estreme, con focus su sistema di ormeggio e pressioni idrodinamiche agenti sullo scafo.

DATI SCAFO	Valore	MSU	Froude scaling	1: 25
Lunghezza	14,8	[m]	λ	0,592
Larghezza	22,5	[m]	λ	0,900
Altezza	7,4	[m]	λ	0,296
Massa	1118000	[kg]	λ^3	71,552
COG (from deck)	-3,622	[m]	λ	-0,1449
Linea di gallegg. (from deck)	-2,59	[m]	λ	0,1036
I44	55354173	[kg*m ²]	λ^5	5,6683
I55	29978075	[kg*m ²]	λ^5	3,0698
I66	72150648	[kg*m ²]	λ^5	7,3882
Draft	4,81	[m]	λ	0,1924

TABELLA 2.3 – SCALATURE GEOMETRICHE E INERZIALI DELLO SCAFO

In entrambe le campagne precedenti era stato usato un ormeggio auto-allineante a linea singola, che permetteva quindi al prototipo di allinearsi con la direzione dell’onda. Questo aspetto aveva enormi vantaggi in termini di semplificazione del progetto: con ormeggio auto-allineante, il moto del WEC si riduce a un semplice moto di beccheggio (o pitch); rollio e imbardata diventano moti secondari, con effetti trascurabili ai fini del calcolo. La scelta di un ormeggio semplificato, poco impattante sulla dinamica dello scafo, era giustificato dal fatto che le prove avessero il focus di validare il modello di PEWEC.

Come vedremo in seguito, questa volta, è stato scelto per il dispositivo PeWEC reale un ormeggio mono-direzionale: ciò significa che la direzione dello scafo è fissa, a meno di un leggero gioco delle linee d’ormeggio, che consentono piccole rotazioni.

Questo cambio di rotta ha almeno tre importanti motivazioni:

- 1) Nel sito di riferimento le onde sono molto direzionali
- 2) Questo sistema di ormeggio evita problematiche legate all’orientazione in caso di coesistenza mare e corrente (soprattutto quando il mare non è molto energetico il dispositivo si può allineare con la corrente)
- 3) Questo tipo di ormeggio semplifica la questione del cavo elettrico (nell’altro caso bisognerebbe pensare ad uno swivel elettro-meccanico non commerciale e costruito ad hoc, soluzione non banale).

La conseguenza di quanto detto sopra è che con questa nuova configurazione, il dispositivo può trovarsi nella condizione di dover incontrare onde non solo in direzione longitudinale, ma anche trasversale.

A livello di progetto, si aggiunge una difficoltà non indifferente: se in precedenza i vincoli si riducevano al rispetto dei valori scalati di massa, posizione del baricentro e momento d’inerzia attorno all’asse di beccheggio (asse y nel nostro caso), adesso è necessario rispettare contemporaneamente anche gli altri due momenti di inerzia rispetto agli assi di rollio (asse x) e imbardata (asse z).

Stabiliti tutti i vincoli legati alla fisica dell'esperimento, ci si è dovuti scontrare con i limiti ed esigenze legate alla realtà: per la realizzazione del prototipo, si è preferito che esso fosse altamente customizzabile e che la maggior parte dei componenti fosse facilmente reperibile sul mercato.

Il requisito di customizzabilità ha un duplice scopo:

1. Poter adattare e riutilizzare il prototipo per esperimenti futuri con diverso layout rispetto a quello attuale.
2. Poter effettuare modifiche e regolazioni a posteriori, con prototipo già in configurazione definitiva.

Per ovviare al primo punto, è stato pensato di inserire una sorta di interfaccia universale smontabile tra scafo e struttura/strumentazione interna, in modo tale da avere strutture interne modulari che permettessero un'agevole e veloce variazione di configurazione del dispositivo.

Per quel che riguarda il secondo punto, l'incertezza principale sta nell'inevitabile discrepanza che si crea tra i calcoli effettuati numericamente sul CAD per il calcolo di massa, baricentro e inerzie del dispositivo, e quello che si va a misurare sull'oggetto reale. Questo introduce la necessità di avere un sistema di regolazione, che permetta di spostare in tempo reale la distribuzione della massa all'interno dello scafo.

Come soluzione, condivisa dal team di sperimentazione, è stato proposto di utilizzare la tecnologia Rexroth, per creare una struttura di fissaggio e tuning della zavorra. Quest'ultima è composta da blocchetti d'acciaio di diversa misura, muniti di asole che permettono di avvitarle sulle barre Rexroth.

In Appendice A è possibile vedere i disegni CAD del prototipo, da diverse prospettive.

2.3 Descrizione sistema di mooring

Per la scalatura del mooring, si è partiti dai dati di predimensionamento ottenuti su Orcaflex.

Più in dettaglio, la fase di progettazione dell'ormeggio ha seguito il seguente schema:

- 1) Individuazione degli stati di mare da simulare da contorno ambientale: in accordo alla normativa DNV-OS-E301 [12], il sistema di ormeggio deve essere progettato prendendo in considerazione lo stato ondoso del mare con periodo di ritorno di 100 anni [07].
- 2) La scelta della configurazione di ormeggio non è sempre un cavillo piuttosto ostico. L'inclusione del mooring nei tool di progettazione dei Wave Energy Converter è spesso complicata e vincolante in termini di software capability e tempo di calcolo. A tal proposito ci si rifà non solo all'esperienza pregressa ma anche alla letteratura disponibile [2], [3], [4]. A tal proposito quando un sito consente l'uso di un ormeggio di tipo monodirezionale (l'onda ha una direzionalità predominante) la scelta più ovvia ricade sulla tipologia di ormeggio a catenaria.
- 3) Dalla scelta del tipo di ormeggio si procede quindi con la modifica della configurazione ai fini di soddisfare i criteri definiti dalla norma DNV-OS-E301 [12] e ridurre l'impatto della dinamica del mooring sulla produttività del dispositivo. Perciò verrà eseguito un processo iterativo di verifica del modello.

Questo processo iterativo manuale si concentra su due obiettivi: riduzione dei carichi dell'ormeggio e minimizzazione dell'impatto sulla dinamica del PEWEC in condizioni operative.

L'analisi, di cui esamineremo i risultati più avanti, verte sui seguenti aspetti fondamentali, essenziali nello studio di un sistema di ormeggio per Wave Energy Converter:

- Tensioni alle ancore
- Tensioni ai fairleads

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

Come già annunciato, il sistema di ormeggio scelto è di tipo a catenaria, che utilizza dei jumper per scaricare la parte verticale delle tensioni delle catene e lasciare quindi il dispositivo libero di beccheggiare.

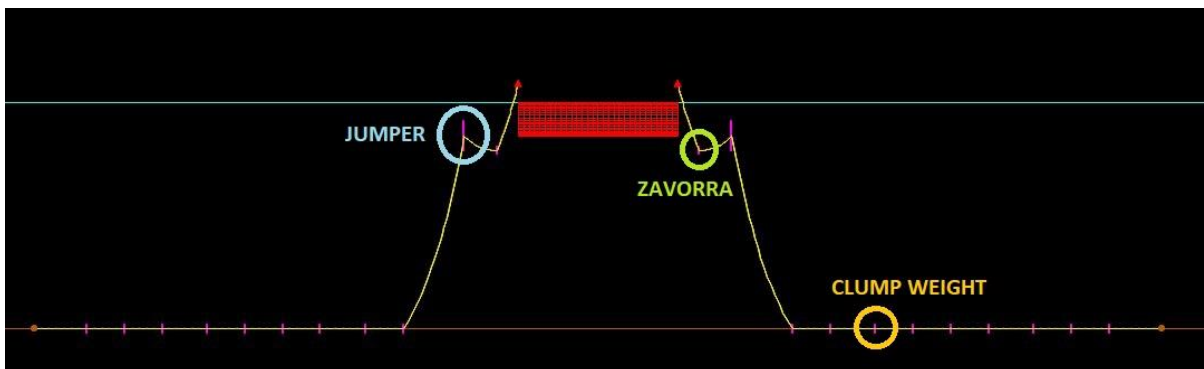


FIGURA 2.1 - CONFIGURAZIONE SISTEMA DI ORMEGGIO.

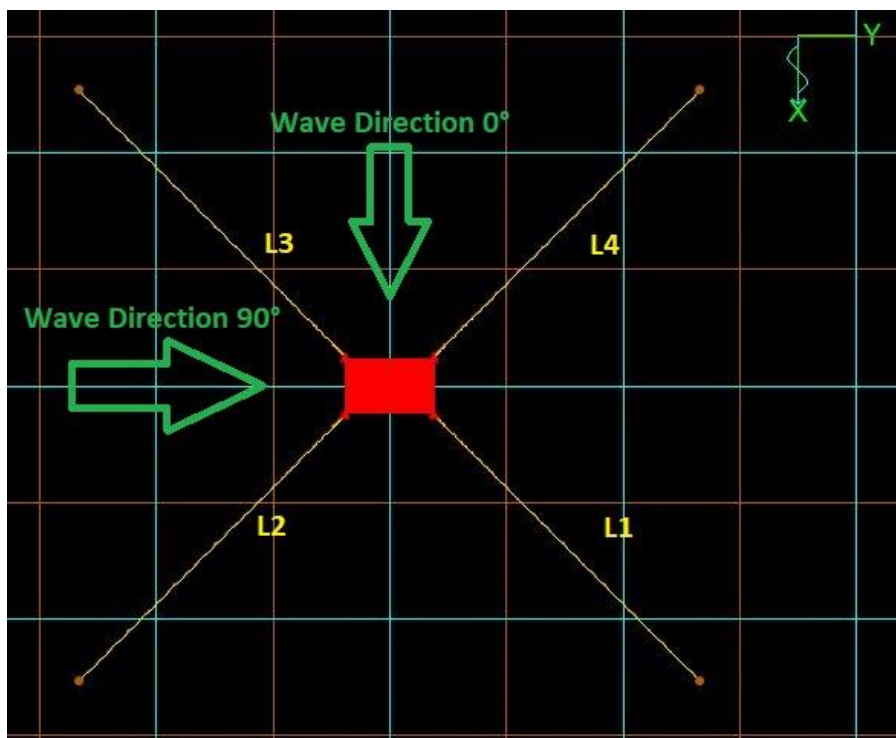


FIGURA 2.2 - MOORING SYSTEM LAYOUT.

Nel corso del processo di design sono state testate varie configurazioni, tenendo in considerazione la variazione del diametro nominale della catenaria (e quindi la restoring force dovuta dal peso lineare della stessa), e facendo variare numero e dimensione dei clump-weight, che impattano fortemente nella resistenza dell'ormeggio in onda estrema.

Dopo aver analizzato l'influenza delle varie catene si è scelto di procedere con la catena caratterizzata da $d=150$ mm, in quanto garantisce le condizioni più favorevoli in termini di anchor uplift, forze di ritorno e resistenza delle linee.

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

TABELLA 2.4 - PROPRIETÀ CATENE CONSIDERATE.

Le proprietà dell'ormeggio trovate dopo una serie di tentativi sono:

Anchor radius [m]	110.2
Anchor radius massimo in scala (vasca Napoli) [m]	4.5
Fattore di scala richiesto (vasca Napoli)	1/25
Lunghezza Linea Ancora-jumper [m]	104.0
Lunghezza linea Jumper-fairlead [m]	17.34

TABELLA 2.1 - PROPRIETÀ LINEA DI ORMEGGIO

I fairleads sono posizionati precisamente negli spigoli dello scafo (si noti che nella Figura 2.1 la parte emersa dello scafo non è rappresentata).

Viste le tensioni generate nel caso dell'ormeggio proposto con un anchor radius di circa 110 m, per non aumentare eccessivamente né la massa delle catene, che causerebbe un incremento inaccettabile dell'ipotetico costo di ormeggio, né dell'anchor radius, che causerebbe sia un incremento di costo che un decremento del fattore di scala richiesto, sono state aggiunte delle masse concentrate sulle bottom lines (Clump Weights, vd. Figura 2.1).

Il modello presentato, scelto dopo un procedimento iterativo di selezione, ha le seguenti caratteristiche:

- 9 Clump Weights per linea, distanziati tra loro di 9 m. Il primo si trova ad una distanza pari a 10 m dall'ancora, aventi una spinta netta negativa di 9.5 ton;
- 1 Jumper per linea, avente una Net Buoyancy di circa 18 ton, posto a 104.0 m dall'ancora;
- 1 Zavorra per linea, avente una spinta netta negativa di 7.5 ton.

In tabella è possibile vedere in dettaglio quanto appena detto:

Posizione elementi Jumper-Zavorra				Coeff. Froude	Valore scalato
1	Clump-Weight	[m]	10	1	0,4
2	Clump-Weight	[m]	18	1	0,72
3	Clump-Weight	[m]	26	1	1,04
4	Clump-Weight	[m]	34	1	1,36
5	Clump-Weight	[m]	42	1	1,68
6	Clump-Weight	[m]	50	1	2
7	Clump-Weight	[m]	58	1	2,32
8	Clump-Weight	[m]	66	1	2,64
9	Clump-Weight	[m]	74	1	2,96
10	Jumper	[m]	104,014	1	4,16056
11	Zavorra	[m]	110,948	1	4,43792
12	Golfare	[m]	121,35	1	4,854

TABELLA 2.6 – DESCRIZIONE E SCALATURA DELLA CATENA DELL'ORMEGGIO

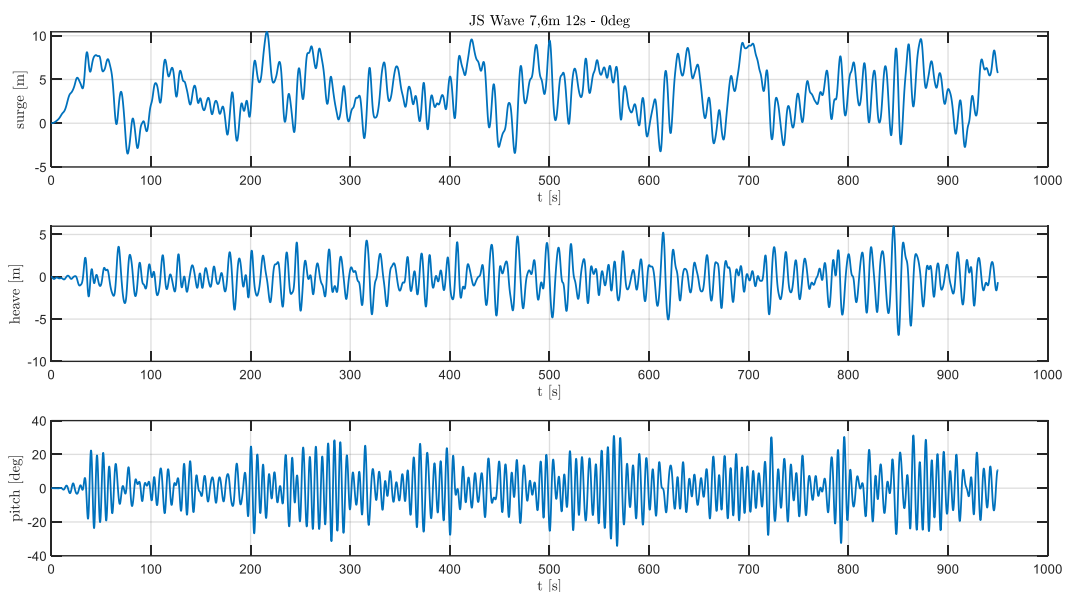


FIGURA 2.3 - DATI CINEMATICA, ONDA JONSWAP FRONTALE.

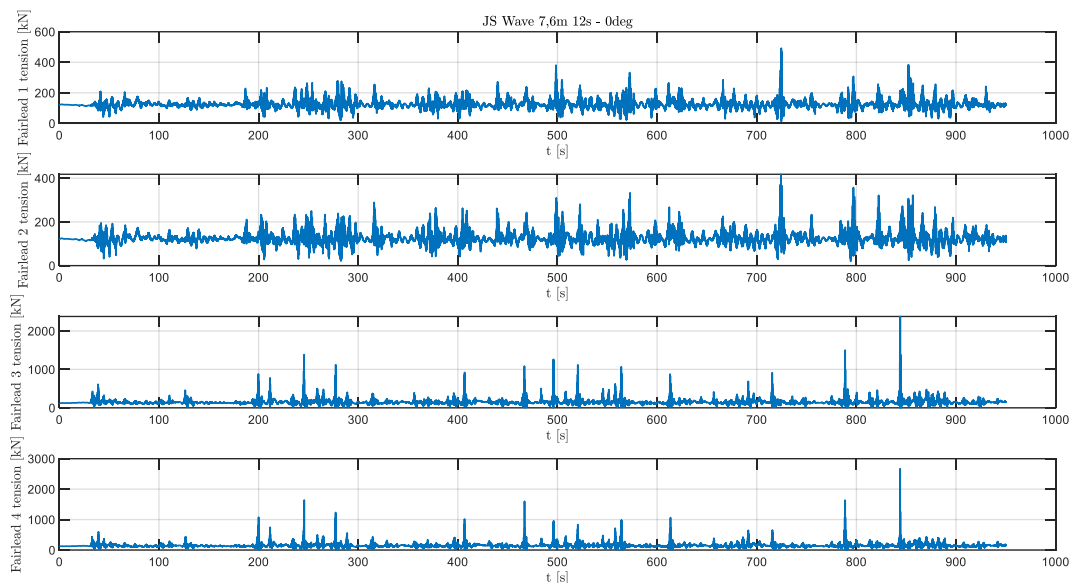


FIGURA 2.4 - TENSIONI AI FAIRLEADS, ONDA JONSWAP FRONTALE.

In Figura 2.3 e Figura 2.4 sono presenti le storie temporali di cinematica e tensione ai fairlead per una delle onde analizzate dal modello OrcaFlex.

I risultati ottenuti sono relativi a onde del contour, dunque onde estreme con un periodo di ritorno di un secolo. I risultati mostrano che la tensione di sollevamento alle ancore è dell'ordine di 10 ton, dunque relativamente basso. Le tensioni ai fairlead sono invece molto più consistenti, anche a causa dell'influenza delle zavorre sulle tensioni di briglia. L'uso delle zavorre è tuttavia necessario per rendere più stabile l'ormeggio, riducendo le tensioni alle ancore e l'offset dello scafo, che ha escursioni massime sul piano orizzontale di circa 20 m. Per le prove effettuate, le tensioni massime esercitate sull'ormeggio sono riportate nella tabella seguente:

std. Anchor Tension (kN)	max Anchor Tension (kN)	std. Jumper Tension (kN)	max Jumper Tension (kN)	std. Clump Weight Tension (kN)	max Clump Weight Tension (kN)	std. Fairlead Tension (kN)	max Fairlead Tension (kN)
301,3	9867,1	348,2	9342,5	367,7	8946,7	366,9	9080,8

TABELLA 2.7 - TENSIONI MASSIME CARATTERISTICHE SULL'ORMEGGIO

Si osserva che la tensione massima è significativamente maggiore delle altre considerate dal momento che le linee posteriori dell'ormeggio rispetto all'onda sono soggette a carichi di strappo. Un'ulteriore influenza sui valori di picco di tensione è dovuta al valore del passo di integrazione adottato per la simulazione. Ciò è probabilmente riconducibile a fenomeni di risonanza tra gli elementi della catenaria in quanto tali valori non si ripercuotono mai alla linea e non sono presenti su fairlead ed elementi di collegamento. Un'analisi di sensibilità potrebbe essere necessaria, sebbene per le prove fatte si è notata una stabilizzazione dei valori massimi delle tensioni per i passi di integrazione adottati.

2.4 Scalature

Dal punto di vista delle scalature è stato effettuato un ridimensionamento di tutti i componenti, andando a correggere tutti le incompatibilità createsi scalando contemporaneamente più proprietà di uno stesso componente del sistema di mooring.

Fattore di Scala		25		
Proprietà	MSU		Coefficiente di Froude	Valore scalato
Profondità	[m]	32	1	1,28
Massa Clump-Weight	[kg]	16285,71	3	1,04228544
Densità Clump-Weight	[kg*m ⁻³]	2400	0	2400
Lunghezza Catena	[m]	121,35	1	4,854
Massa lineare Catena	[Kg*m ⁻¹]	448	2	0,7168
EA Catena	[kN]	1,92E+06	3	122,976
Massa Jumper	[kg]	5200	3	0,333
Volume Jumper	[m ³]	23,761	3	0,001520704
Densità Jumper	[kg*m ⁻³]	218,85	0	218,846
Massa Zavorra	[kg]	12857,14	3	0,82285696
Densità Zavorra	[kg*m ⁻³]	2400	0	2400
Distanza Clump 1	[m]	10	1	0,4
Distanza Clump 2-9	[m]	9	1	0,36
Net buoyancy Clump-Weight	[kg]	9500	3	0,60799984
Net buoyancy Jumper	[kg]	-18561	3	-1,187904
Net buoyancy Zavorra	[kg]	7500	3	0,479999893

TABELLA 2.8 – SCALATURA ORMEGGIO

Una delle principali incompatibilità riguarda la diversa densità dei Clump-Weight e delle zavorre al vero (ipotizzati in calcestruzzo) rispetto a quella utilizzata nel modello OrcaFlex. In tale modello, in fase di pre-design dell'ormeggio, le proprietà idrodinamiche (specialmente dei Clump-Weight adagiati sul fondale) sono trascurabili, quindi, per una corretta scalatura degli elementi, è stata considerata soltanto la loro Net Buoyancy, trovando poi elementi in commercio che soddisfino tale proprietà.

Una seconda incompatibilità riguarda la scalatura delle proprietà della catena: lavorando in similitudine idrodinamica, la scalatura di Froude non permette di scalare contemporaneamente lunghezza, peso lineare e rigidità della catena. Infatti, per il prototipo in scala, è possibile trovare in commercio catene che rispettino i valori di lunghezza e peso lineare, ottenuti dalla scalatura dei corrispettivi valori al vero, tuttavia, le stesse presentano una rigidità assiale maggiore di quella desiderata: in questo caso si è ovviato al problema inserendo in serie alla catena, nel punto di ormeggio sullo scafo, una molla, in modo da dare al sistema d'ormeggio l'elasticità desiderata. Dai risultati ottenuti, la scelta è ricaduta su una molla avente una costante elastica pari a 25.3 N/mm.

Infine, si ricorda che la vasca di prova ha una profondità superiore ai 4 metri, dimensione ben superiore a quella richiesta per l'esperimento. Si è proceduti quindi, in collaborazione con i tecnici dell'Università di Napoli, alla definizione di un fondo virtuale che verrà installato per ottenere la scalatura desiderata e riprodurre l'esatta batimetria del sito di riferimento.

3 Sistema d'acquisizione

La campagna sperimentale ha come scopo quello di acquisire le tensioni sugli ormeggi e le pressioni sullo scafo in condizioni di onda estrema, in modo da validare le simulazioni effettuate in ambienti Orcaflex e CFD.

Per la progettazione del sistema d'acquisizione e la scelta dei suoi componenti, si è partiti quindi dal post-processing delle simulazioni in ambiente Orcaflex, per le tensioni sull'ormeggio, e simulazioni in ambiente CFD, per le pressioni sullo scafo. Esse hanno dato come output delle tensioni sull'ormeggio di circa 9000kN e delle pressioni massime sullo scafo di 89 kPa.

Effettuando la solita operazione di scalatura, sono stati ottenuti i seguenti risultati:

Pressione massima sullo scafo [kPa]	89	Pressione massima sullo scafo scalata [kPa]	3.56
Tensione massima al fairlead [kN]	9000	Tensione massima al fairlead [kN]	0.576

TABELLA 3.1 – SCALATURA SOLLECITAZIONI SULLO SCAFO E SULL'ORMEGGIO

Tali risultati hanno portato alla scelta di sensori che avessero un fondo scala opportuno.

Passando all'intero sistema d'acquisizione, esso prevede un sistema on-board della National Instruments composto da un controllore alimentato a batterie e munito di router wifi per la trasmissione in tempo reale dei dati acquisiti dei sensori: in figura 3.1 è possibile vedere uno schema semplificato della sua architettura.

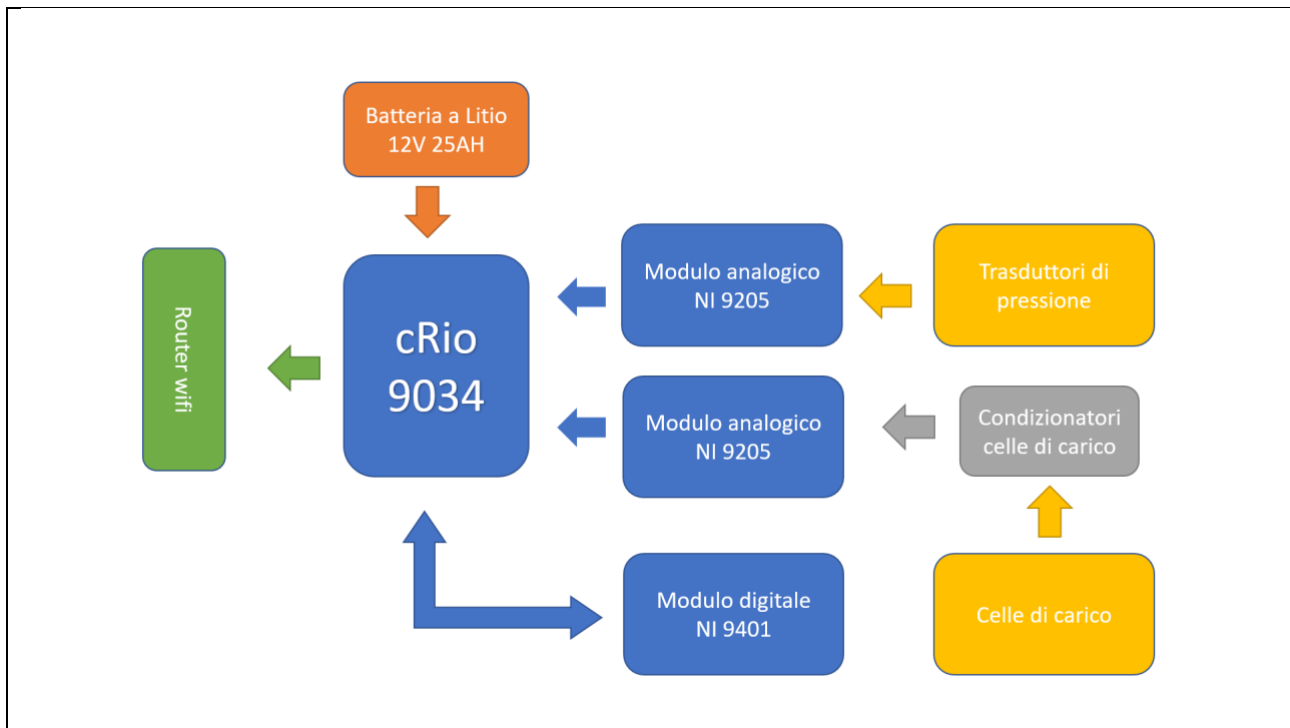


FIGURA 3.1 – DESCRIZIONE SISTEMA D'ACQUISIZIONE

In tabella è possibile trovare la lista completa dei componenti:

Componente	Marca/Modello	Quantità
Controllore	NI/Crio 9034	1
Modulo digitale	NI/9401	1
Modulo analogico	NI/9205	2
Batteria	LaserElectronic/ Batteria a Litio 12V 25AH 25000Ma	2
Router wifi	TPlink/EAP225	1
Connettore modulo analogico	NI/9940	2
Connettore modulo digitale	NI/9924	1
Cella di carico 100 lb	Futek/Isb210 – 100 lb	4
Cella di carico 10 lb	Futek/Isb210 – 10 lb	4
Condizionatore cella di carico	Futek/IAA100	4
Trasduttore di pressione	NXP/MPVZ5010GW7U	30

TABELLA 3.2 – COMPONENTI SISTEMA D'ACQUISIZIONE

In tabella sono stati inseriti due tipi di celle di carico che differiscono per fondo scala: le prime con fondo scala da 100 lb sono necessarie per le misurazioni relative alle prove in onda estrema, mentre, nel caso di onde regolari, operative e per la misurazione del free decay del prototipo, dove si presenta un ordine di grandezza in meno di forza, sono necessarie quelle con fondo scala da 10 lb.

Infine, il nostro sistema di acquisizione verrà sincronizzato con quello della vasca di prova, tramite trigger digitale.

La strumentazione fornita dalla vasca comprenderà:

- Sistema di motion capture system qualisys per l'acquisizione del 6 gradi di libertà dello scafo.

- Wave probes capacitive (2-3 per ridondanza), che avranno il compito di misurare l'onda generata.

Appendice A

Di seguito una serie di immagini dell'assieme e della struttura interna, da diverse angolazioni.

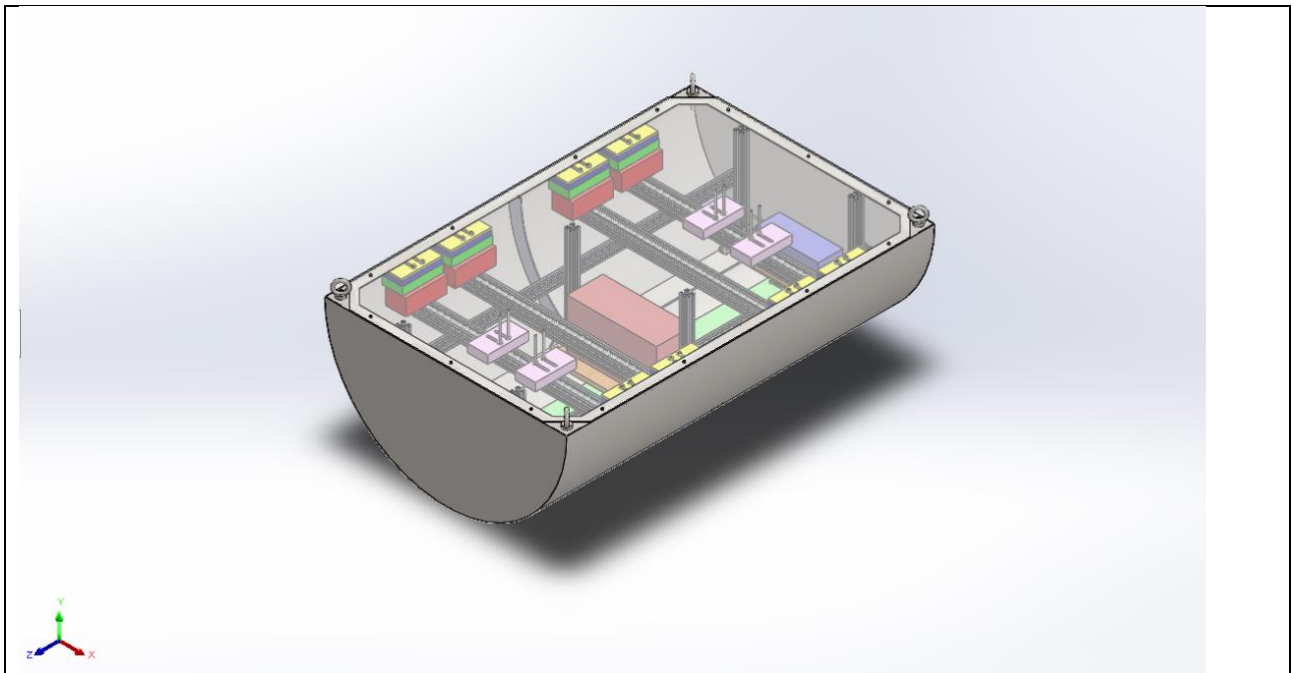


Fig.A.1 – Vista Isometrica prototipo completo

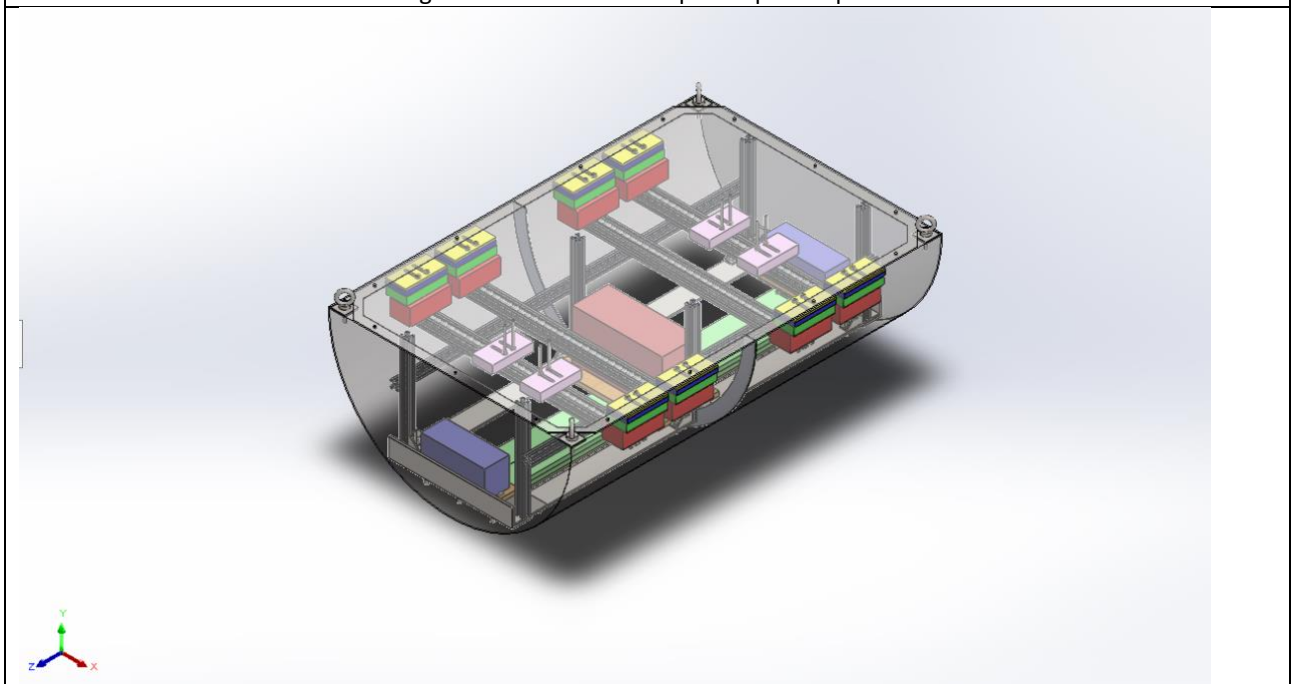


Fig. A.2 – Vista Isometrica prototipo completo in trasparenza

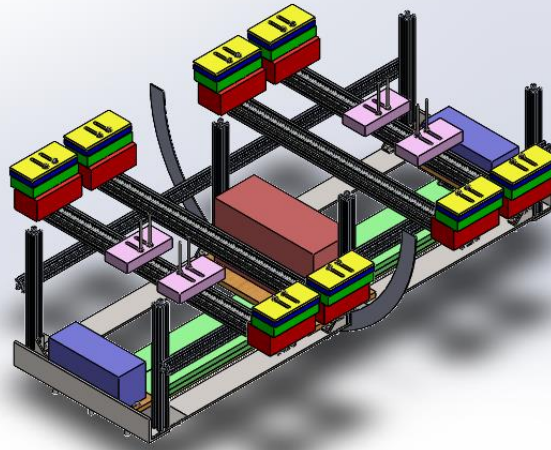


Fig. A.3 – Vista isometrica struttura interna

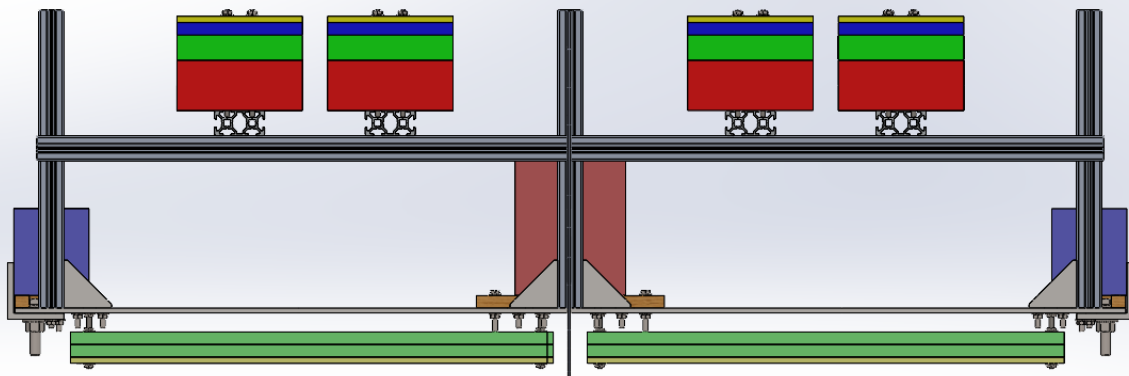


Fig. A.4 – Vista frontale struttura interna

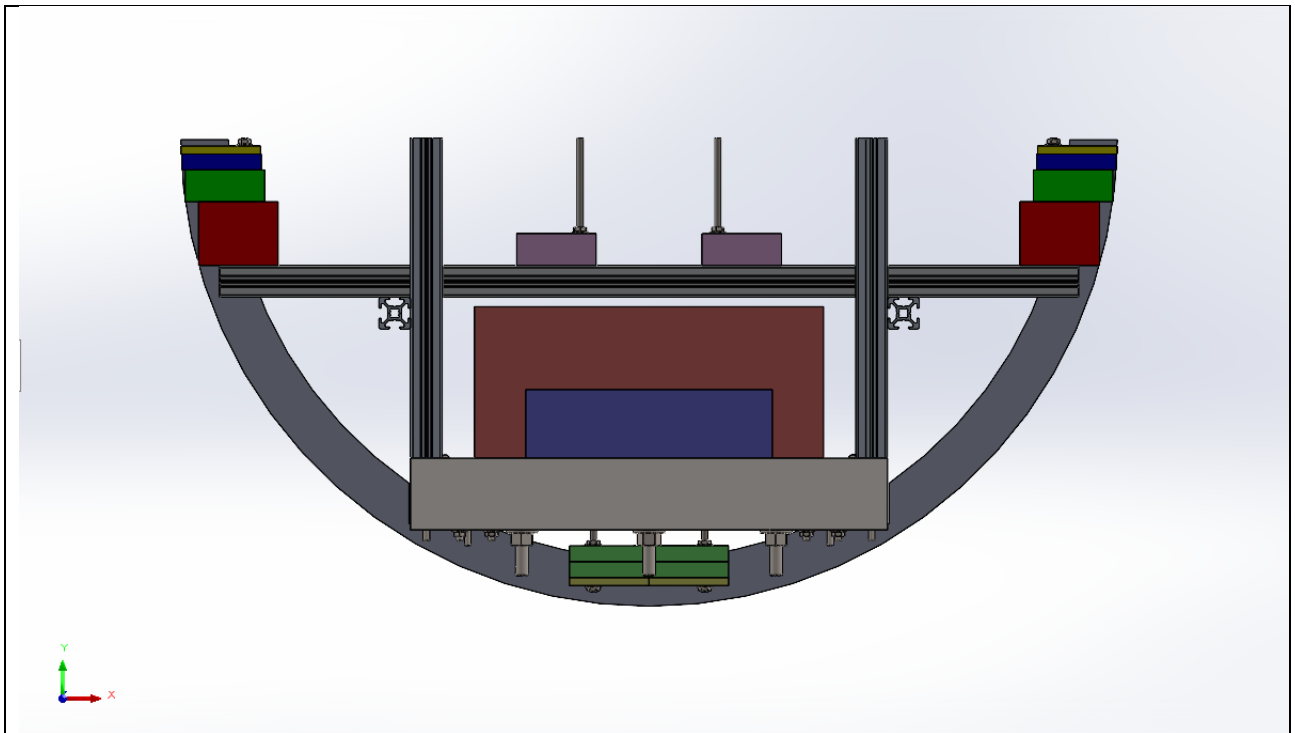


Fig. A.5 – Vista laterale struttura interna

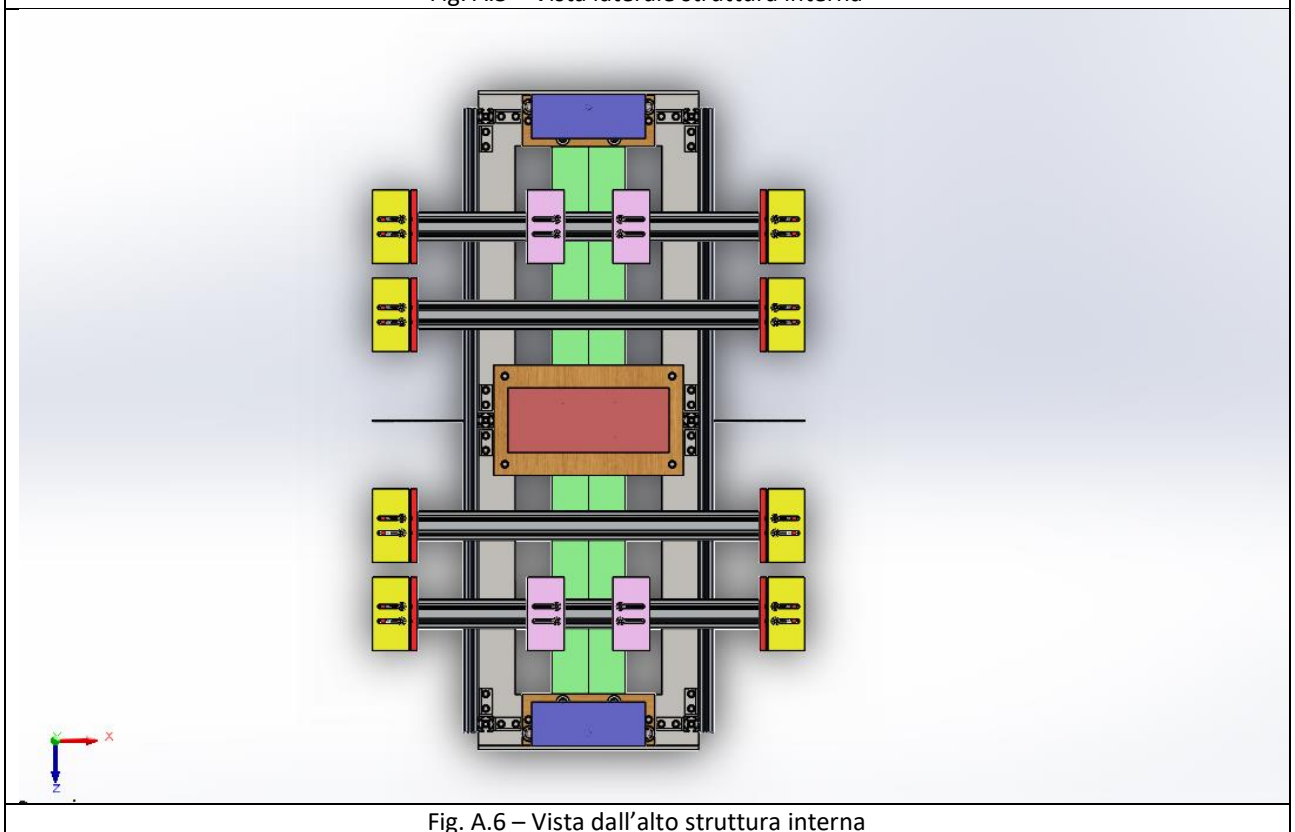


Fig. A.6 – Vista dall'alto struttura interna

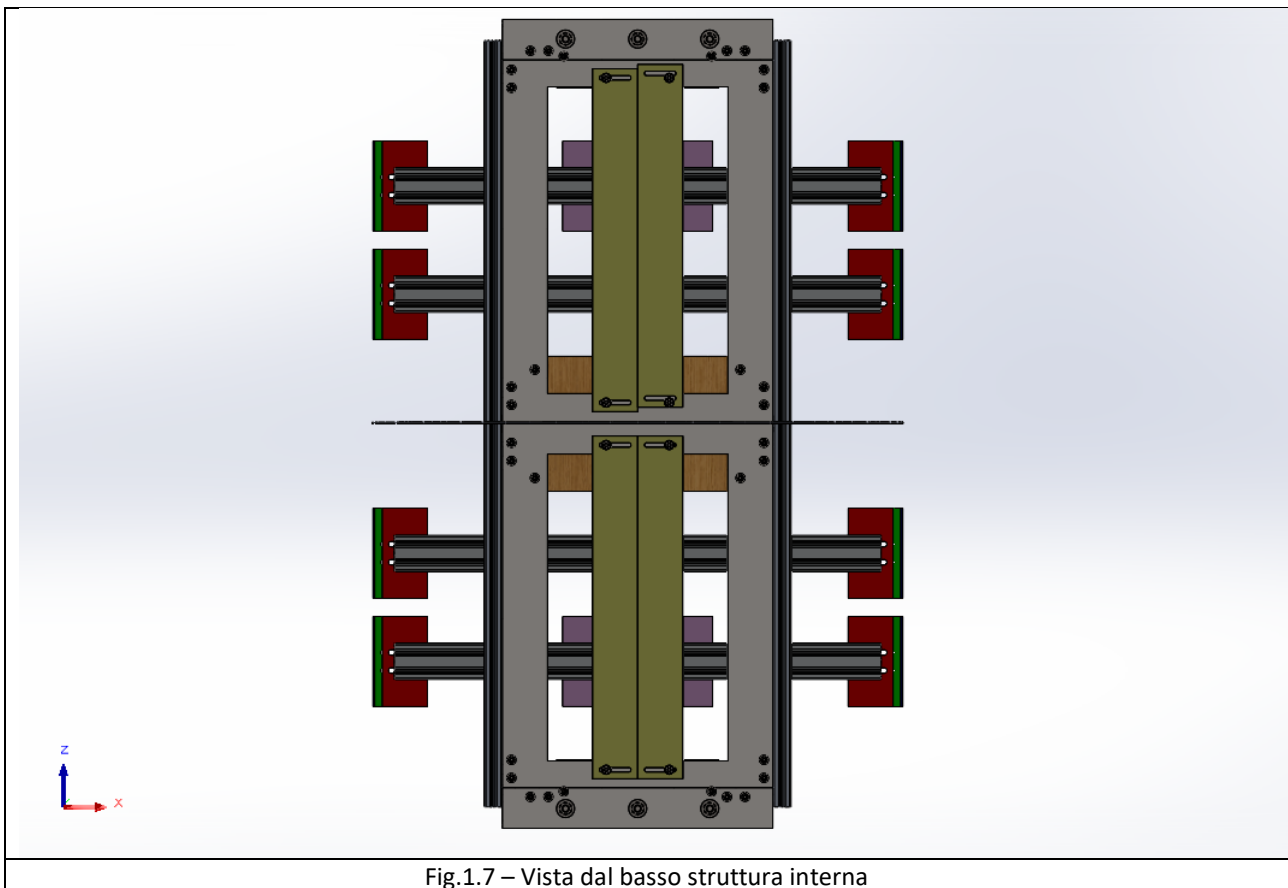


Fig.1.7 – Vista dal basso struttura interna

Appendice B

La seguente tabella riporta la lista completa dei componenti meccanici presenti nel prototipo.

Numero componente	Componente	Quantità	Dimensioni [m]	Peso [g]	Materiale
1	Scafo	1			Acciaio
2	Mensola	2			Acciaio
3	Costola rinforzo scafo	1			Acciaio
4	Riquadro	1			Acciaio
5	Rexroth	6	20x20x237		Alluminio
6	Rexroth	2	20x20x850		Alluminio
7	Rexroth	4	20x40x540		Alluminio
8	Staffa L Rexroth	12	20x40x40		Acciaio
9	Piastra rinforzo golfare	4			Acciaio
10	Golfare M8	4			Acciaio
11	Pannello plexiglass	1			Plexiglass
12	Supporto cRio 9034	1			Legno
13	Supporto batterie	2			Legno
14	Zavorra corta 1 (8 montate)	8	50x100x40	1440	Acciaio
15	Zavorra corta 2 (12 montate)	12	50x100x20	720	Acciaio
16	Zavorra corta 3 (8 montate)	16	50x100x10	360	Acciaio
17	Zavorra corta 4 (8 montate)	16	50x100x5	180	Acciaio

18	Zavorra lunga 1 (8 montate)	8	50x380x10	1466	Acciaio
19	Zavorra lunga 2 (4 montate)	12	50x380x5	733	Acciaio
20	Zavorra corta con scanalatura (0 montate)	8	50x100x20	646	Acciaio

Tab.2.1 Lista componenti meccanici

1

- 4 golfari M8
- 6 viti M8x40
- 10 dadi M8
- 20 rosette per bulloni M8
- 8 viti M4x30 (per supporti di legno)
- 24 viti M4x20 (per accoppiamento Riquadro-Staffa L)
- 8 barre filettate M4x65
- 8 barre filettate M4x85
- 120 rosette per bulloni M4
- 88 dadi M4
- 14 viti M4 brunite (per chiusura coperchio in plexiglass)
- 14 dadi M4 brunite (per chiusura coperchio in plexiglass)
- 28 rosette M4 brunite (per chiusura coperchio in plexiglass)

Per i suddetti elementi si consideri classe di resistenza 8.8 e zincatura, salvo diversa indicazione.

Si considerino inoltre:

- 24 collegamenti staffa a L-Rexroth
- 22 collegamenti tra le barre Rexroth

N.B La staffa ad L della Rexroth (componente N°8) presenta un dente sull'angolo esterno, che fa da guida per l'accoppiamento con le scanalature delle barre Rexroth: nel nostro caso, tale sporgenza, va limata sulla parte inferiore di ogni staffa, per permettere l'accoppiamento con il componente N°4 (Riquadro).

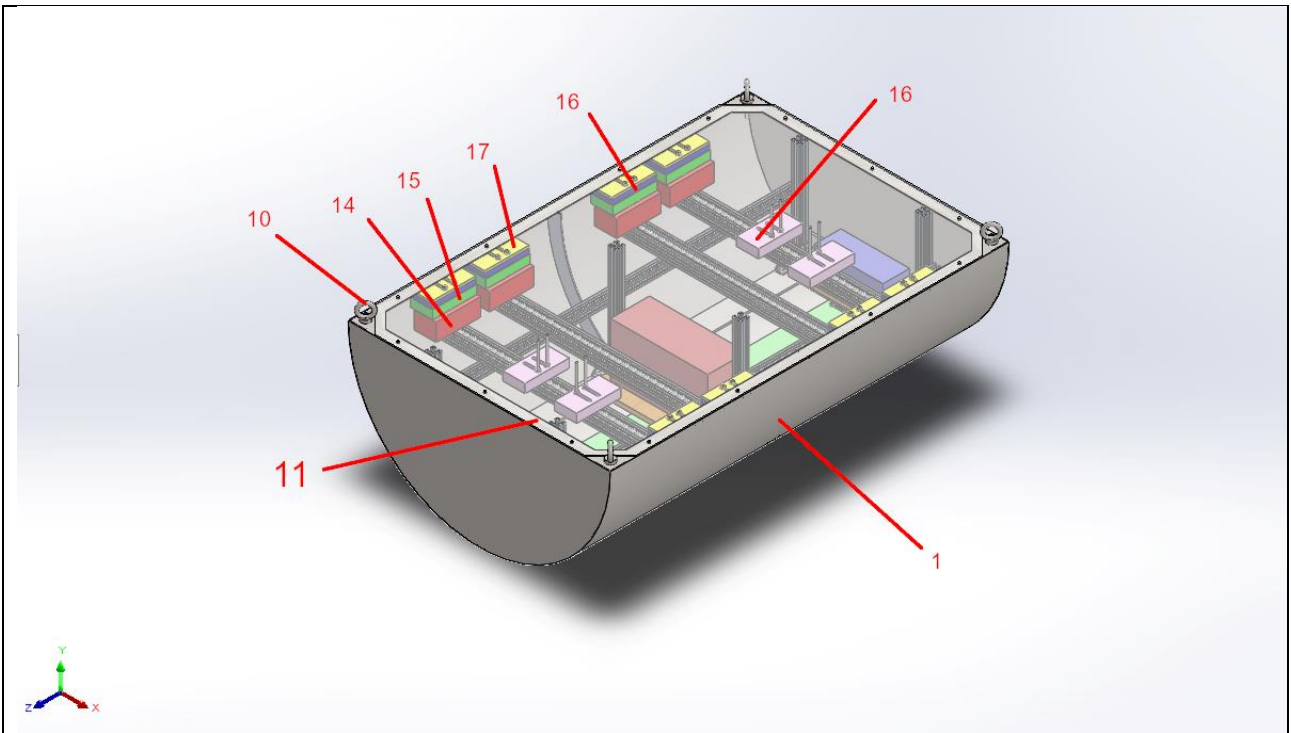


Fig. 2.1 – Numerazione componenti

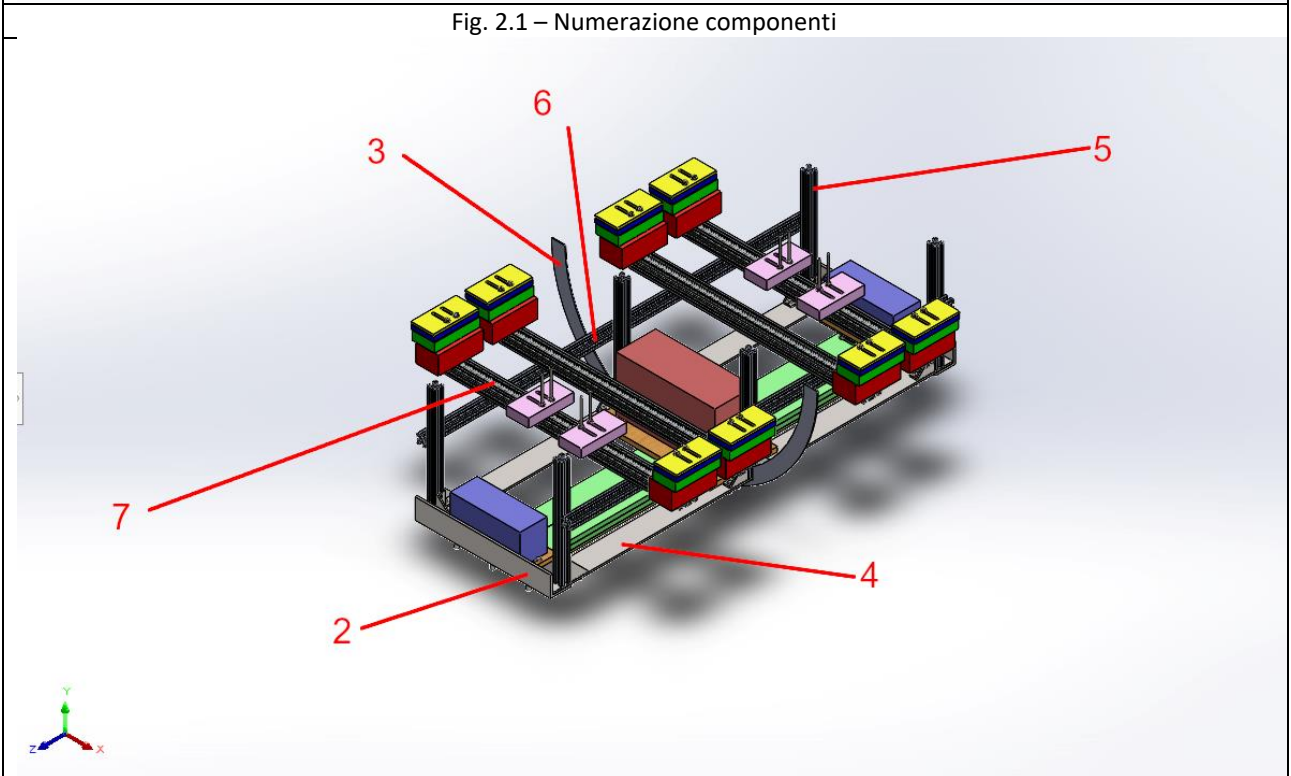


Fig. 2.2 – Numerazione componenti

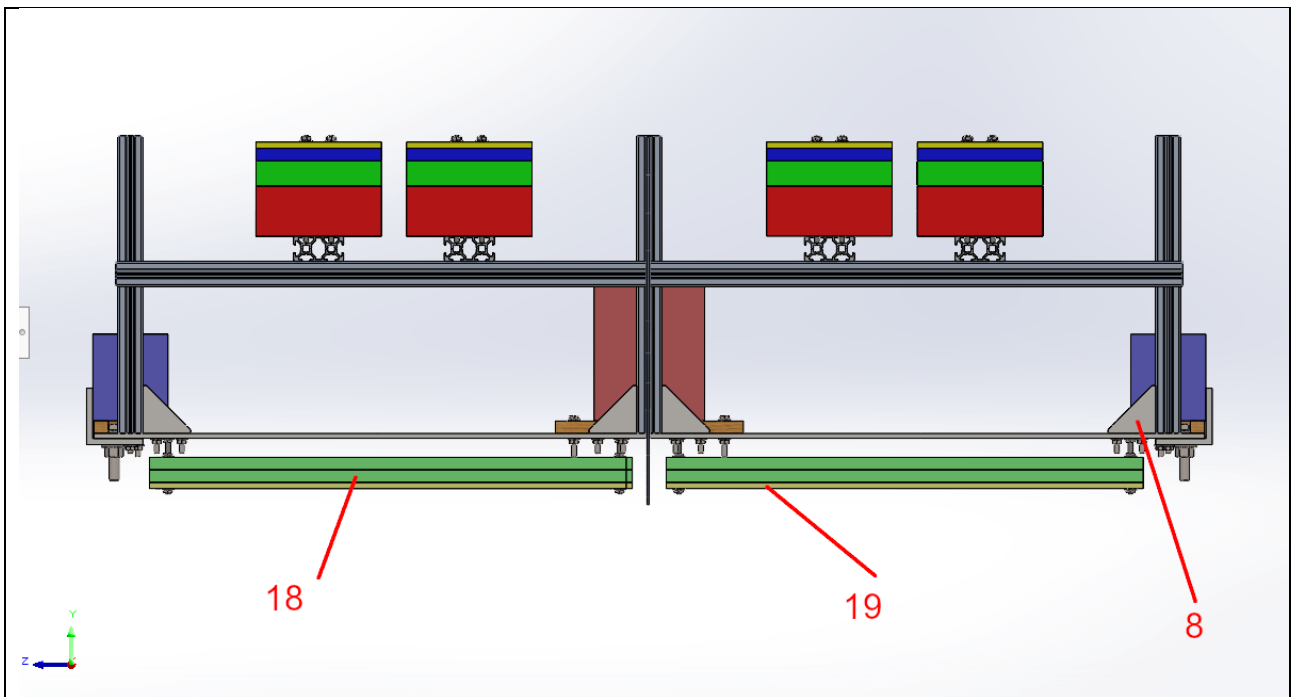


Fig. 2.3 – Numerazione componenti

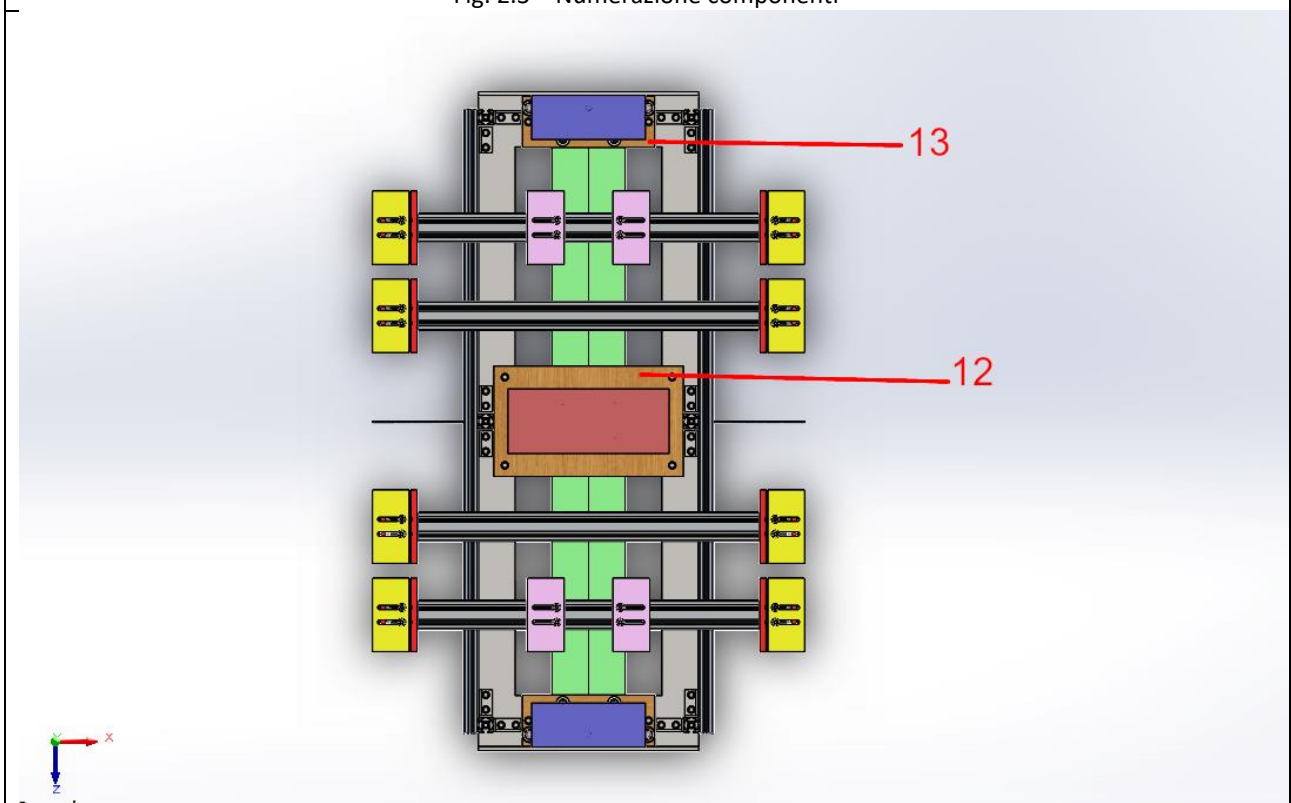


Fig. 2.4 – Numerazione componenti

Appendice C

Di seguito sono inserite le messe in tavola delle parti meccaniche non commerciali da realizzare in officina specializzata.

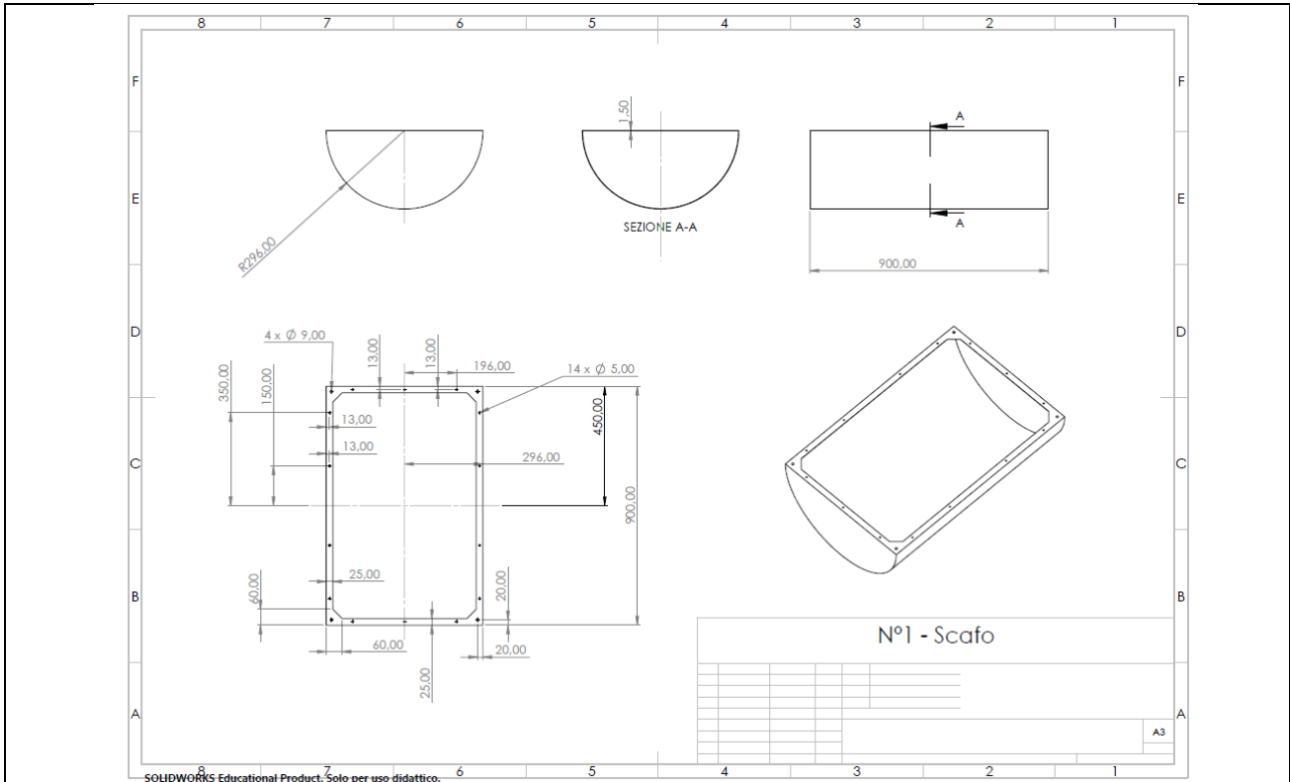


Fig.5.1 – Tavola N°1

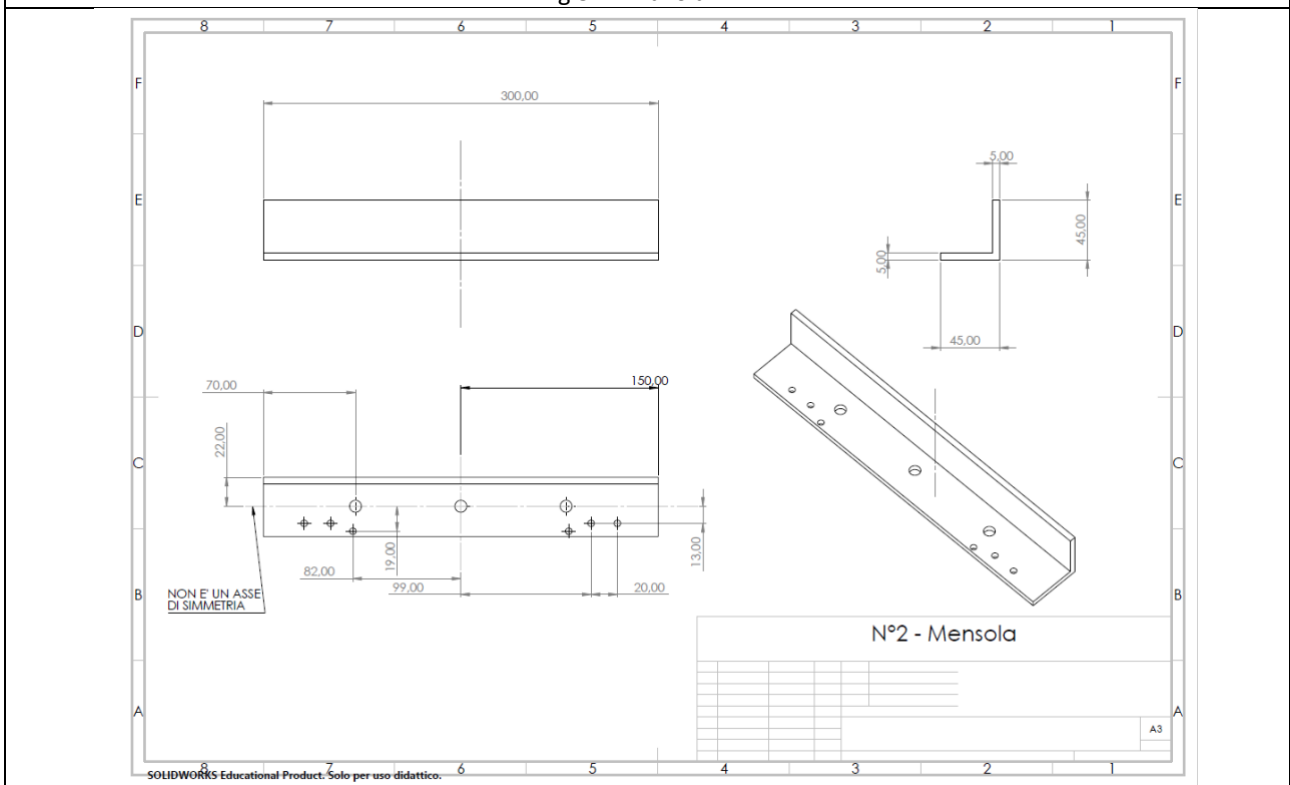


Fig.5.2 – Tavola N°2

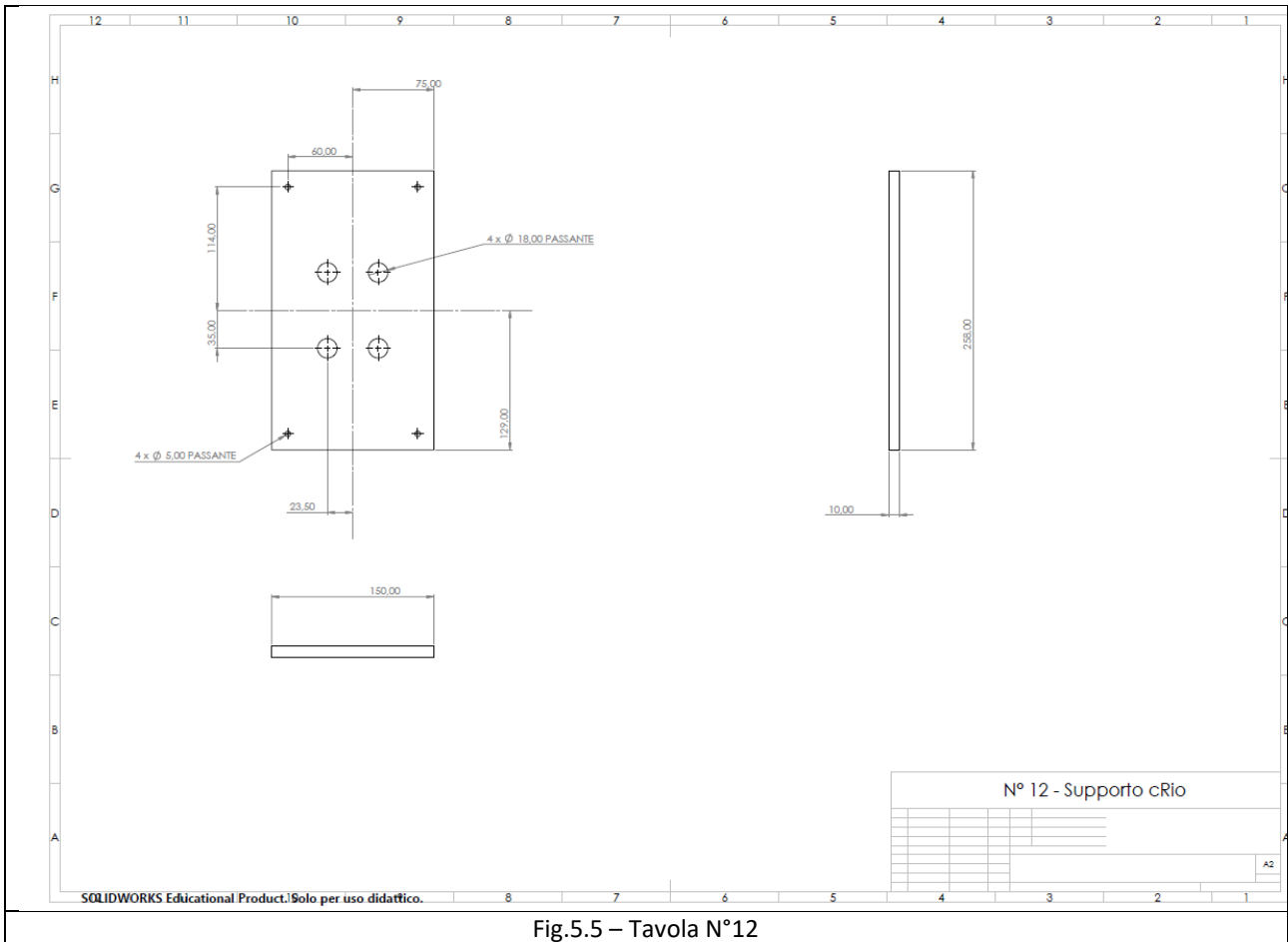


Fig.5.5 – Tavola N°12

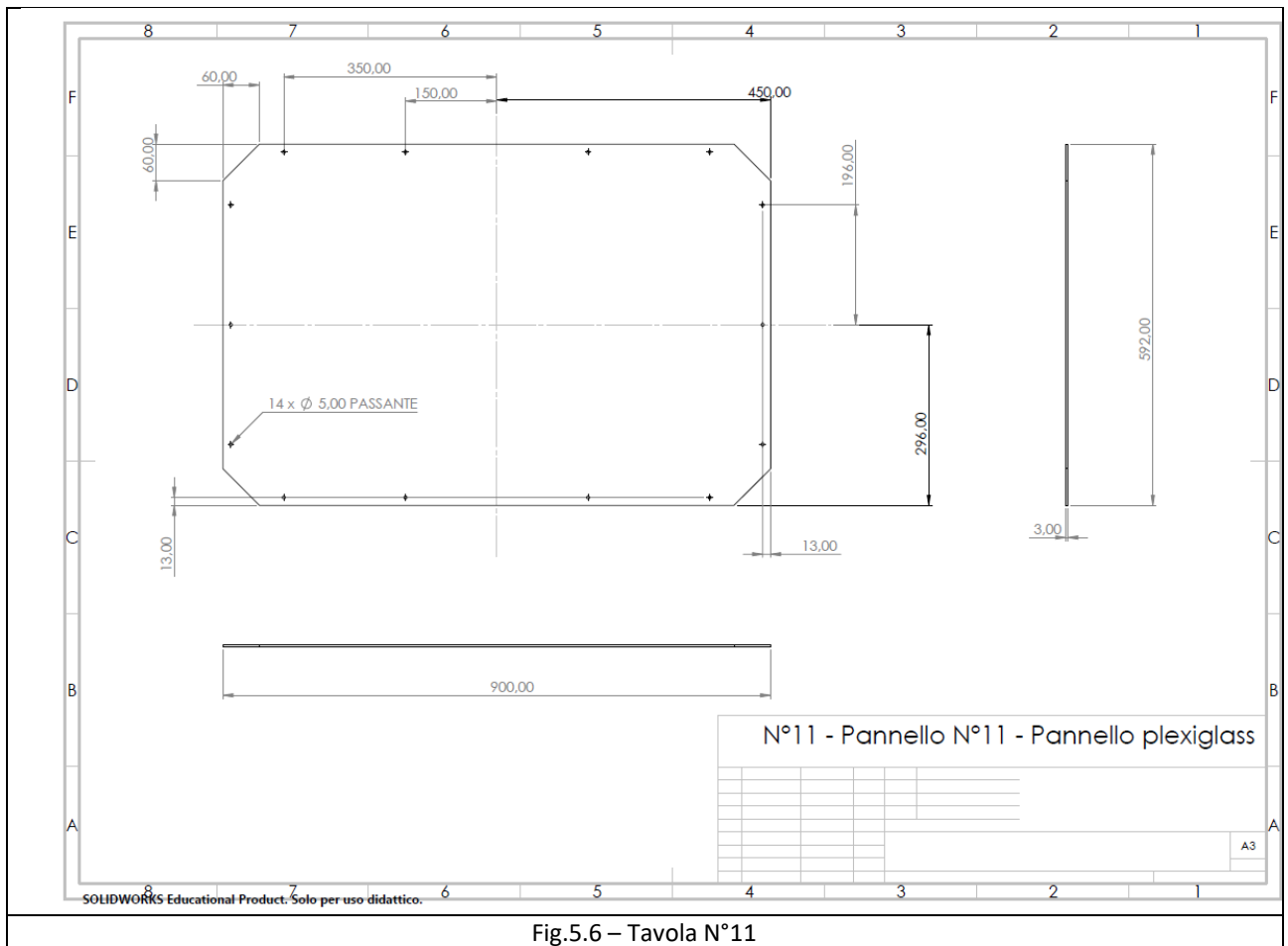


Fig.5.6 – Tavola N°11

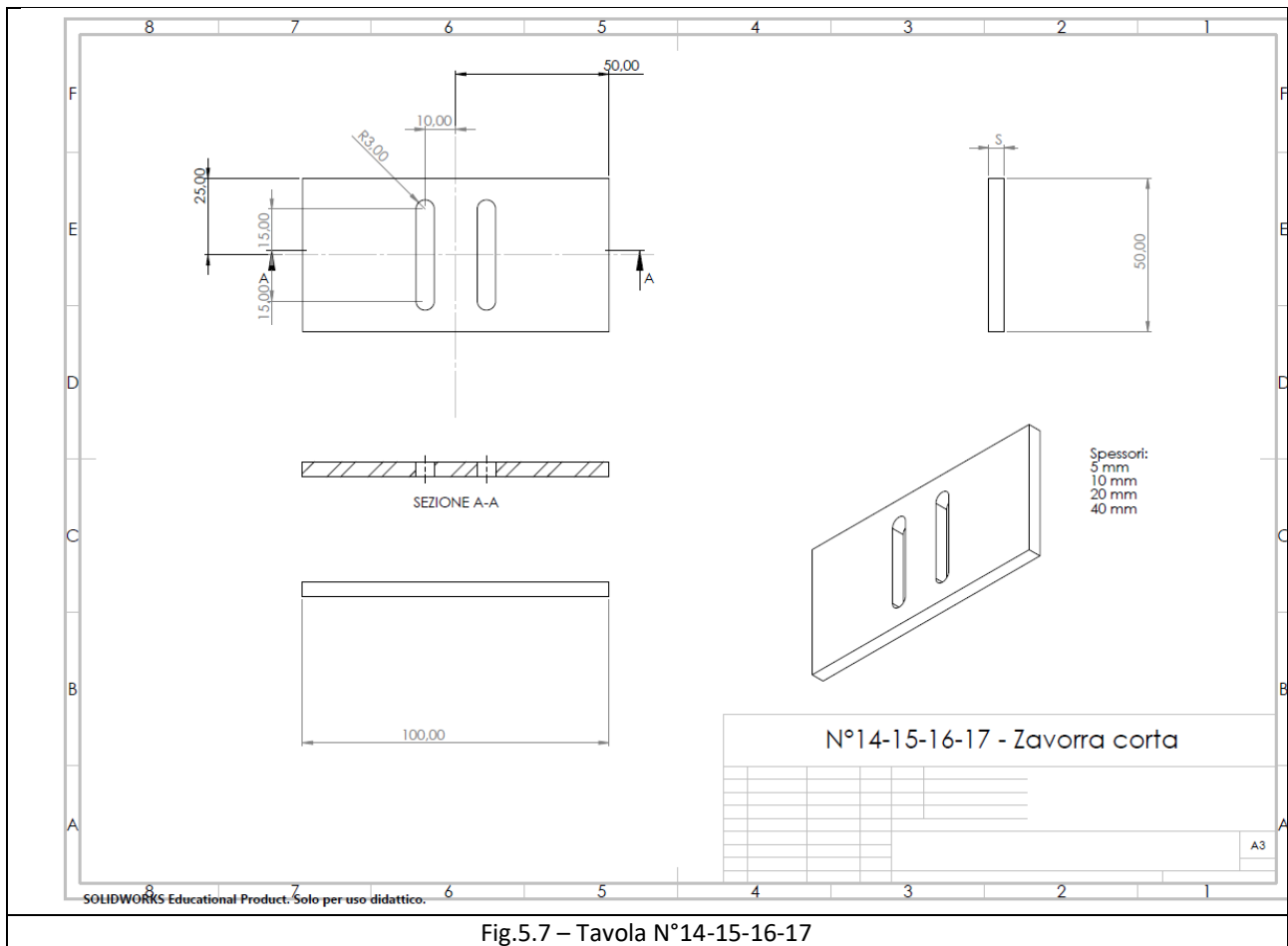


Fig.5.7 – Tavola N°14-15-16-17

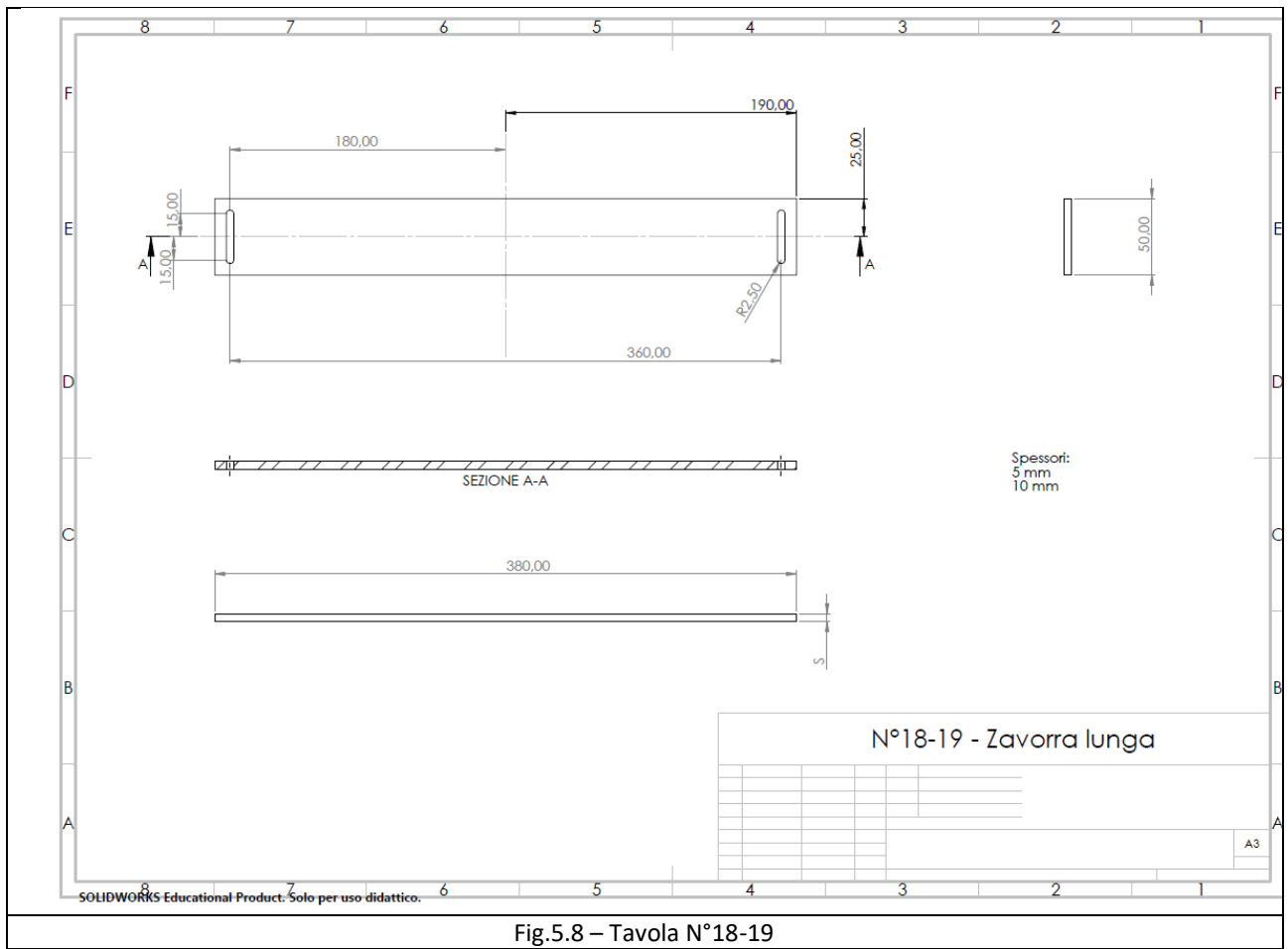


Fig.5.8 – Tavola N°18-19

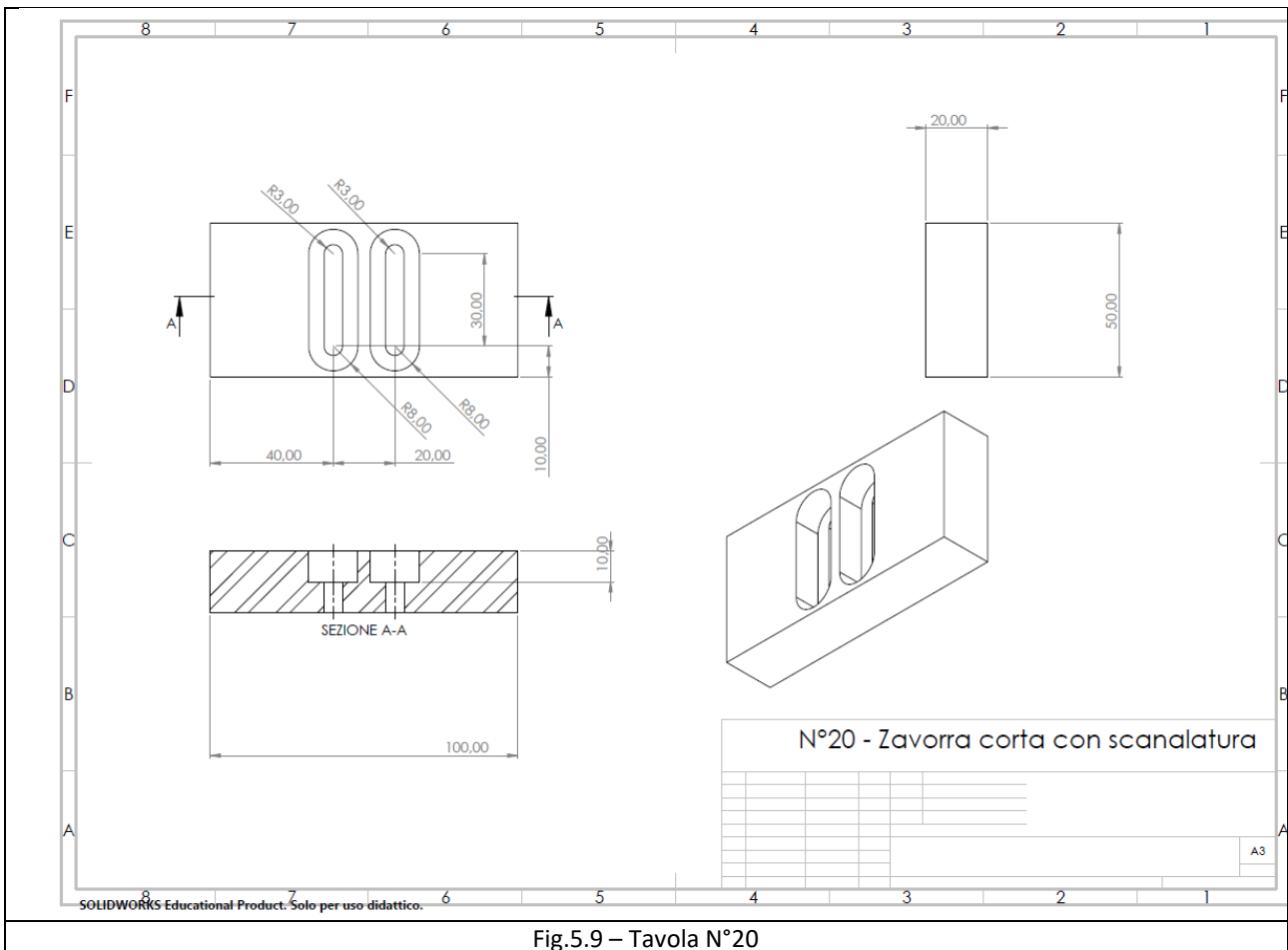


Fig.5.9 – Tavola N°20

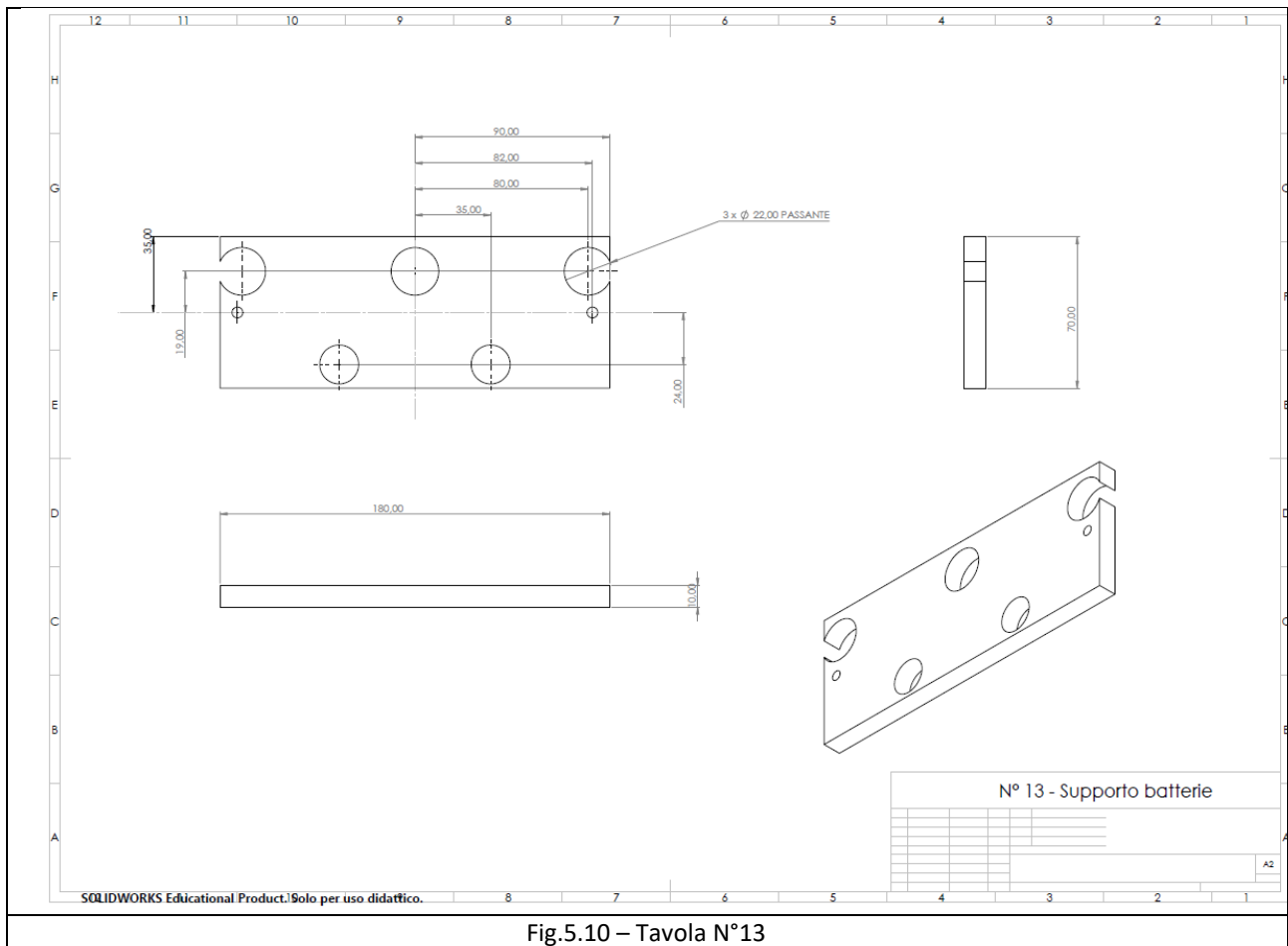


Fig.5.10 – Tavola N°13

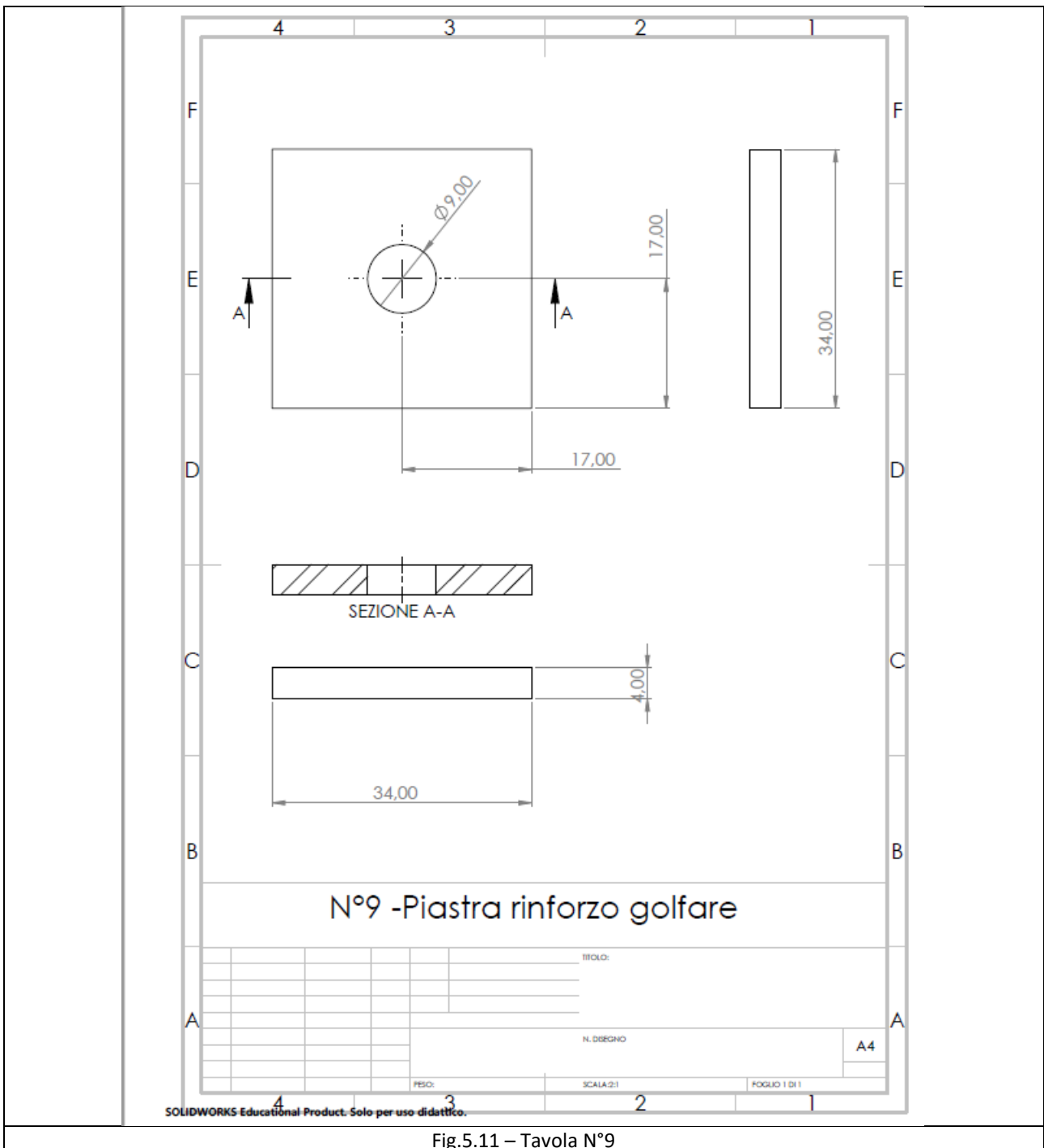


Fig.5.11 – Tavola N°9

Bibliografia

- [01] Recommended practice DNV-rp-c205, Environmental conditions and environmental loads, October 2010. n.d.
<https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnv/codes/docs/2010-10/rp-c205.pdf>.
- [02] Mooring systems for wave energy converters: A review of design issues and choices - Robert E. Harris, Lars Johanning, Julian Wolfram. n.d.
- [03] Comparison and Sensitivity Investigations of a CALM and SALM Type Mooring System for Wave Energy Converters - Arthur Pecher, Aligi Foglia and Jens Peter Kofoed. n.d.
- [04] Screening of suitable mooring systems - Barbara Zanuttigh, Luca Martinelli, Mirko Castagnettifra. n.d.
- [05] IEC IECTS62600-2 - Edition1.0 2016-08 - TECHNICALSPECIFICATION - Marine energy –Wave, tidal and other water current converters –Part 2: Design requirements for marine energy systems. n.d.
- [06] http://www.ilbelconcorso.it/webfm_send/63, [6]. n.d.
- [07] PAR2019-2021-MISE, Deliverable LA1.13: Implementazione in ambiente CFD del convertitore. n.d.
- [08] Hydrodynamic analysis and mooring design of a floating pitching Wave Energy Converter / Passione, Biagio. - (2018). n.d.
- [09] PAR2019-2021-MISE, Deliverable LA1.12: Sviluppo di algoritmi genetici per la progettazione del convertitore. n.d.
- [10] Report RdS/PAR2014/228. n.d. https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/energia-dal-mare/2014/rds-par2014-228.pdf.
- [11] Report RdS/PAR2013/172. n.d. https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/energia-dal-mare/2013/rds-par2013-172.pdf.
- [12] DNV - DNVGL-OS-E301 - Edition July 2018 - Position mooring. n.d.
<http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnvgl/os/2018-07/dnvgl-os-e301.pdf>.
- Babarit, Delhommeau. "Theoretical and numerical aspects of the open source BEM solver." *In Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference*, 2015.
- Busoniu, L., R. Babuska, B. De Schutter, and D. Ernst. *Reinforcement Learning and Dynamic Programming Using Function Approximators*. CRC Press, 2010.
- Comune di Pantelleria. "Piano d'azione per l'energia sostenibile." 2015.
- Cummins. "The impulse response function and ship motions." *Technical Report 1661, Department of the Navy*,, 1962.
- Cummins, W.E. "The Impulse Response Function and Ship Motions." *Schiffstechnik*, 1962: 101-109.
- Kouvaritakis, B., and M. Cannon. *Model Predictive Control: Classical, Robust and Stochastic*. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing, Springer, 2015.
- Mammarella, M., E. Capello, H. Park, G. Guglieri, and M. Romano. "Tube-Based Robust Model Predictive Control for Spacecraft Proximity Operations in the Presence of Persistent Disturbance." *Aerospace Science and Technology*, 2018.
- Mammarella, Martina, and Elisa Capello. "A Robust MPC-based autopilot for mini UAVs." *International Conference of Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2018: 1227-1235.
- Ogilvie. "Recent progress toward the understanding and the prediction of ship motion." *In Proceedings of the 5th Symposium on Naval Hydrodynamics*, 1964.
- Perez, Fossen. "Time- vs. frequency-domain identification of pararametric radiation force models for marine structures at zero speed." *Modeling, Identification and Control: A Norwegian Research Bulletin*, 2008: 29(1):1–19.

Pisacane, Giovanna, Gianmaria Sannino, and Adriana Carillo. "Marine Energy Exploitation in the Mediterranean Region: Steps Forward and Challenges." *Energy Research*, 2018.

Pozzi, Nicola. "Numerical Modeling and Experimental Testing of a Pendulum Wave Energy Converter (PeWEC)." Torino, Italia, 2018.

Rawlings, James B., and David Q. Mayne. *Model Predictive Control: Theory and Design*. Nob Hill Publishing, 2009.

smartisland. <http://www.smartisland.eu/replicabilita/pantelleria.html>. n.d.