

*Università degli Studi di Firenze*

Dipartimento di Energetica Sergio Stecco

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica

Automazione



Tesi di Laurea:

*Progettazione e realizzazione di un propulsore per  
sottomarini*

RELATORE:

*Benedetto Allotta*

CANDIDATO:

*Marco Montagni*

CORRELATORE:

*Luca Pugi*

*Anno Accademico 2010/2011*



*Questa tesi è dedicata a tutte le persone che mi sono state vicine in questi anni e ai miei nonni che sicuramente sarebbero orgogliosi di me.*

---

# Indice

<b>Indice .....</b>	<b>4</b>
Indice delle figure.....	7
Indice delle tabelle .....	11
<b>Introduzione progetto Thesaurus .....</b>	<b>12</b>
<b>1 - "Il sottomarino" .....</b>	<b>14</b>
1.1 - Descrizione fisica .....	15
1.1.1 - Organi di movimento .....	15
1.1.2 - Progettazione per operare in alta pressione.....	18
1.1.3 - Dimensioni, materiali e layout .....	20
1.2 - Descrizione elettrica.....	24
1.2.1 - Strumentazione.....	24
1.2.1.1 Strumentazione per la traiettoria .....	25
1.2.1.2 Strumentazione per la comunicazione .....	28
1.2.1.3 Strumentazione per la missione .....	29
1.2.1.4 Azionamenti e propulsione .....	33
1.2.1.5 Il computer vitale pc/104 .....	34
1.2.2 - Potenza necessaria.....	36
1.2.3 - Schema connessioni .....	38
<b>2 - Le batterie .....</b>	<b>45</b>
2.1 - Tecnologie a confronto.....	46

---

2.1.1 -	Polimeri litio.....	49
2.2 -	Le batterie in commercio.....	51
2.2.1 -	Batterie cilindriche .....	51
2.2.2 -	Batterie prismatiche.....	52
2.2.3 -	Batterie nei cilindri e soluzione adottata .....	54
2.3 -	Revisione del progetto.....	58
<b>3 -</b>	<b>Azionamento Elmo Motion Control .....</b>	<b>60</b>
3.1 -	Il driver.....	61
3.1.1 -	Caratteristiche.....	62
3.1.2 -	Interfaccia software e utilizzo .....	67
3.2 -	Il banco prova.....	70
3.2.1 -	Normativa bassissima tensione .....	70
3.2.2 -	Layout banco prova .....	72
3.2.3 -	Realizzazione .....	74
<b>4 -</b>	<b>Test.....</b>	<b>77</b>
4.1 -	Postazione di test.....	77
4.1.1 -	Struttura della postazione di prova per i Thruster laterali .....	78
4.1.2 -	Struttura della postazione di prova per la propulsione .....	79
4.1.3 -	Motori ed eliche .....	79
4.2 -	Test effettuati.....	85

4.2.1 - Thruster laterali .....	85
4.2.1.1 Prove senza riduttore.....	88
4.2.1.2 Prove con riduttore.....	89
4.2.2 - Propulsione principale.....	91
4.3 - Elaborazione dei dati.....	95
Conclusioni.....	106
BIBLIOGRAFIA.....	108

---

## Indice delle figure

Figura 1 Tifone.....	16
Figura 2 Il gruppo di propulsione in sezione.....	17
Figura 3 Principio di pascal.....	19
Figura 4 Veicolo bilanciato .....	20
Figura 5 Veicolo sbilanciato .....	21
Figura 6 Centro di massa in sezione.....	22
Figura 7 Tifone senza scafo .....	23
Figura 8 Profondimetro Sx e trasduttore di pressione Dx .....	25
Figura 9 Doppler velocity log .....	26
Figura 10 Piattaforma inerziale .....	26
Figura 11 Magnetometro.....	27
Figura 12 Modulo Gps .....	27
Figura 13 Modem acustici.....	28
Figura 14 Modulo wireless.....	29
Figura 15 Laser .....	30
Figura 16 Illuminatori led .....	31
Figura 17 Camera.....	31
Figura 18 Scansonar e immagini prodotte.....	32
Figura 19 Scheda madre per elaborazione dati.....	32
Figura 20 Azionamento Elmo .....	33

---

Figura 21 Faulhaber a Sx e Maxon a Dx.....	34
Figura 22 Un PC/104 plus.....	35
Figura 23 Grafico a torta dei consumi del profilo di ricerca .....	37
Figura 24 Grafico a torta dei consumi del profilo di raccolta dati.....	38
Figura 25 Legenda dei cavi da usare nelle sezioni del tifone .....	40
Figura 26 Sezione di poppa schematica .....	41
Figura 27 Sezione batterie di poppa.....	41
Figura 28 Sezione centrale .....	42
Figura 29 Sezione pacco batterie di prora .....	42
Figura 30 Sezione di prora .....	43
Figura 31 Caratteristiche delle tecnologie fornita da Kokam.....	48
Figura 32 Valutazione ingombri batterie.....	54
Figura 33 Batterie Kokam in sezione nel veicolo.....	55
Figura 34 Durata in funzione della scarica delle celle adottate .....	56
Figura 35 Cicli di vita con out OFF a 3V.....	57
Figura 36 Cicli di vita con out OFF a 3,35V.....	58
Figura 37 Progetto preliminare .....	59
Figura 38 Elmo driver .....	60
Figura 39 Usi del driver Elmo [20] .....	61
Figura 40 Dimensioni Elmo .....	62
Figura 41 Schema a blocchi Elmo Driver .....	65
Figura 42 Curva di dissipazione del calore Elmo.....	65



---

Figura 43 Esempio di generazione di curve di velocità per il settaggio Elmo .....	68
Figura 44 Smart terminal Elmo .....	69
Figura 45 Motion Monitor Elmo .....	69
Figura 46 Schema unifilare .....	73
Figura 47 Vista superiore interna banco prova Elmo .....	75
Figura 48 Vista esterno banco prova Elmo e motore a sinistra .....	76
Figura 49 Postazione di test .....	77
Figura 50 Assieme struttura prove Thruster .....	78
Figura 51 Assieme di struttura postazione di propulsione .....	79
Figura 52 Modellazione profili elica .....	80
Figura 53 Diagramma sperimentale eliche Kaplan con mantello.....	83
Figura 54 Prototipazione rapida, eliche a passi diversi su supporto.....	84
Figura 55 Esploso reale della struttura di prova Thruster .....	86
Figura 56 Struttura prove Thruster .....	87
Figura 57 Esploso struttura prove per la propulsione .....	92
Figura 58 Struttura test per la propulsione .....	92
Figura 59 Thruster senza riduttore marcia "1" Forza/Giri elica .....	95
Figura 60 Thruster senza riduttore marcia "1" Forza /Potenza assorbita.....	96
Figura 61 Thruster senza riduttore marcia "2" Forza /Giri elica .....	97
Figura 62 Thruster senza riduttore marcia "2" Forza /Potenza assorbita.....	97
Figura 63 Thruster con riduttore 1:5 marcia "1" Forza/Giri elica .....	98
Figura 64 Thruster con riduttore 1:5 marcia "1" Forza /Potenza assorbita.....	98

---

Figura 65 Thruster con riduttore 1:5 marcia "2" Forza /Giri elica .....	99
Figura 66 Thruster con riduttore 1:5 marcia "1" Forza /Potenza assorbita.....	99
Figura 67 Thruster marcia "1" con e senza riduttore Forza /Potenza assorbita .....	100
Figura 68 Thruster marcia "1" e marcia "2" con riduttore Forza /Potenza assorbita .....	101
Figura 69 Propulsione marcia Forza /Giri elica .....	102
Figura 70 Propulsione retro marcia Forza /Giri elica .....	102
Figura 71 Propulsione marcia Forza /Potenza necessaria .....	103
Figura 72 Propulsione marcia Forza /Potenza necessaria .....	103
Figura 73 Propulsione marcia e retromarcia Forza /Giri elica $P/D=1,2$ .....	104
Figura 74 marcia e retromarcia Forza /Potenza assorbita elica $P/D=1,2$ .....	104
Figura 75 Caratteristica tempo/comando di velocità e velocità effettiva .....	105

---

## Indice delle tabelle

Tabella 1 Caratteristiche strumentazione per la traiettoria .....	25
Tabella 2 Caratteristiche strumentazione di propulsione .....	28
Tabella 3 Caratteristiche strumentazione di missione .....	30
Tabella 4 Caratteristiche strumentazione propulsione.....	33
Tabella 5 Stima dei consumi .....	36
Tabella 6 Tabella della strumentazione nelle sezioni .....	39
Tabella 7 Pinout connettori .....	44
Tabella 8 Tecnologie a confronto.....	47
Tabella 9 Batterie cilindriche valutate.....	52
Tabella 10 Batterie Prismatiche valutate.....	53
Tabella 11 Pinout Elmo.....	63
Tabella 12 Tabella retroazioni.....	64
Tabella 13 Modelli e caratteristiche principali Elmo .....	66
Tabella 14 Caratteristiche motori eliche.....	82
Tabella 15 Prove Thruster senza riduttore marcia avanti .....	88
Tabella 16 Prove Thruster senza riduttore marcia indietro .....	89
Tabella 17 Prove con riduttore marcia avanti.....	90
Tabella 18 Prove con riduttore marcia indietro .....	91
Tabella 19 Prove propulsori marcia avanti.....	93
Tabella 20 Prove propulsori marcia indietro .....	94

# Introduzione progetto Thesaurus

Questo lavoro di tesi vuole essere un punto di riferimento per tutti quelli che si avvicineranno al progetto Thesaurus, ponendo i punti chiave della filosofia di progettazione preliminare e delle scelte adottate.

I lavori presentati si sviluppano in capitoli, il primo vuole fornire una descrizione sia fisica sia elettrica di tutta la progettazione allo stato attuale dell'arte. Il secondo capitolo corrisponde allo studio per la scelta degli accumulatori di carica. Il terzo capitolo descrive il banco prova pensato per i test sul passo delle eliche del quarto e ultimo capitolo. Sono stati inseriti capitoli esaurienti sui problemi e sulle tematiche studiate nel corso di questi mesi e che riassumono lo stato attuale del progetto seguito con esperti in tutti i campi. La descrizione del progetto che segue è stata tratta dalla presentazione del progetto alla Regione Toscana.

Obiettivo complessivo del progetto Thesaurus è lo sviluppo di metodologie e tecnologie scientifiche multidisciplinari al fine di individuare, censire e documentare manufatti e relitti subacquei di valore archeologico ed etnoantropologico.

Tale obiettivo prevede l'integrazione di tecnologie innovative tipiche dell'ingegneria e dell'informatica con le conoscenze e le metodologie d'indagine storiche, archivistiche e archeologiche.

Gli obiettivi specifici di ricerca di tale progetto consistono nello:

- sviluppo di tecnologie e dispositivi innovativi per la navigazione autonoma di robot subacquei a basso costo, da impiegare nella ricerca di oggetti sui fondali marini;
- sviluppo di metodologie ed algoritmi di ricerca ottimizzati per la cooperazione e il coordinamento fra veicoli, il campionamento adattivo, per una ottimizzazione della copertura di vaste aree di fondali marini con squadre (*sciame*) di veicoli subacquei, allo scopo di ridurre i tempi ed i costi delle missioni di ricerca sottomarina;
- sviluppo di tecniche di imaging e di analisi automatica delle immagini ottiche, acustiche e magnetiche, allo scopo di individuare anomalie associate a relitti e per la loro successiva classificazione;
- sviluppo di sistemi di ricostruzione 3D e sintesi visiva a partire dal flusso ottico e da sequenze di immagini acquisite, per la creazione di un ambiente virtuale interattivo, adatto alla rappresentazione di siti archeologici

sottomarini a fini di divulgazione scientifica e museale;

- interpretazione archeologica e storico-artistica dei dati rilevati per la produzione di schede archeologiche multimediali interattive dei reperti e dei siti;
- elaborazione e diffusione di prodotti di comunicazione per la valorizzazione dei beni culturali rinvenuti, tramite l'utilizzo degli strumenti e delle tecnologie implementate (schede dei siti, schede delle opere, portale web, prodotti multimediali, etc...).

Lo sviluppo delle moderne tecnologie di esplorazione dei fondali oggi raggiunto offre un potente strumento di ricerca agli archeologi ed agli storici impegnati nello studio e nella salvaguardia del patrimonio artistico e culturale, nonché alle autorità addette al loro censimento e conservazione. Il progetto THESAURUS si propone di integrare tecnologie afferenti a settori diversi dell'informatica, dell'ingegneria, dei modelli matematici e del software, al fine di sviluppare tecnologie e metodiche per l'individuazione, il censimento, la mappatura e lo studio dei manufatti archeologici dispersi sui fondali. Sebbene le metodologie studiate dal progetto siano di carattere generale, i casi di studio e lo scenario applicativo di test faranno particolare riferimento all'Arcipelago Toscano. Il progetto cade nell'ambito delle scienze e tecnologie per la salvaguardia e la valorizzazione dei beni culturali, in quanto le metodologie e le tecnologie sviluppate consentiranno di investigare in modo sistematico aree marine, per il censimento dei relitti presenti sui fondali e ne renderanno possibile la loro documentazione mediante mezzi ottici, acustici e magnetici, consentendo la fruizione sia a studiosi che ad un largo pubblico di un patrimonio sconosciuto ed in ogni caso non accessibile in maniera diretta.

# 1 - "Il sottomarino"

La progettazione di un veicolo parte da presupposti da rispettare per ottenere un progetto conforme alle richieste volute. Nel caso specifico il progetto Thesaurus vuole ottenere un veicolo sottomarino della tipologia A.U.V. acronimo di Autonomous Underwater Vehicle. Questa tipologia di veicoli è caratterizzata dalla proprietà di essere scollegata fisicamente dalla sorgente di energia e controllo per il moto, infatti questo veicolo deve essere programmato in modo da percorrere un tracciato in maniera autonoma prendendo come riferimento un'unità di superficie con la quale comunica tramite modem acustici sottomarini. Inoltre l'unità di superficie tramite GPS stima le coordinate della propria posizione. Sarà quindi possibile anche stimare la posizione che il veicolo traccia in prossimità del fondale tramite una triangolazione effettuata per mezzo di modem acustici e altri sensori. La progettazione di un veicolo A.U.V. è generalmente più complessa rispetto a quella di veicoli R.O.U.V, acronimo di Remotely Operated Underwater Vehicle per i quali il controllo del movimento è realizzato in remoto da un operatore, e si è imbattuta in vari problemi legati quindi alla traiettoria desiderata che il veicolo deve poter realizzare in modo autonomo e con la generazione di minore errore possibile. A tale scopo sono stati usati sensori di vario genere anche se una delle parti più complesse della progettazione sarà la realizzazione di un programma che riesca, tramite opportuni filtri di stima, a combinare tutte le informazioni e svolgere il compito per cui è stato pensato. Inoltre la filosofia secondo la quale è stata progettata la veste fisica rende questo veicolo, con modifiche minime, aggiornabile nel tempo. Il principio di modularità è stato uno degli elementi chiave di ogni aspetto e proprio questa caratteristica permetterà aggiornamenti tecnologici futuri senza dover intraprendere una riprogettazione, ma non solo: tale caratteristica permetterà una modellazione sicuramente più semplice per quelli che saranno gli usi futuri e variegati di questa "base" iniziale che potrà fare da trampolino a qualsiasi facoltà, associazione, impresa che desideri un veicolo sottomarino. Anche dal punto di vista dell'affidabilità sono state prese decisioni al fine di diminuire e in alcuni casi eliminare le parti meccaniche e ridurre quindi ogni possibile probabilità di rottura e usura nel tempo. A questo scopo sono stati eliminati timoni e superfici di

navigazione orientabili spesso usati in progetti di questo tipo, in quanto, pensando ad un uso intensivo comprensivo di carico e scarico da imbarcazioni, erano soggetti a rotture e deformazioni. Altre caratteristiche saranno valutate in seguito e in questo capitolo dove è stata fatta una descrizione fisica e dell'elettronica adottata rivelando le principali scelte progettuali.

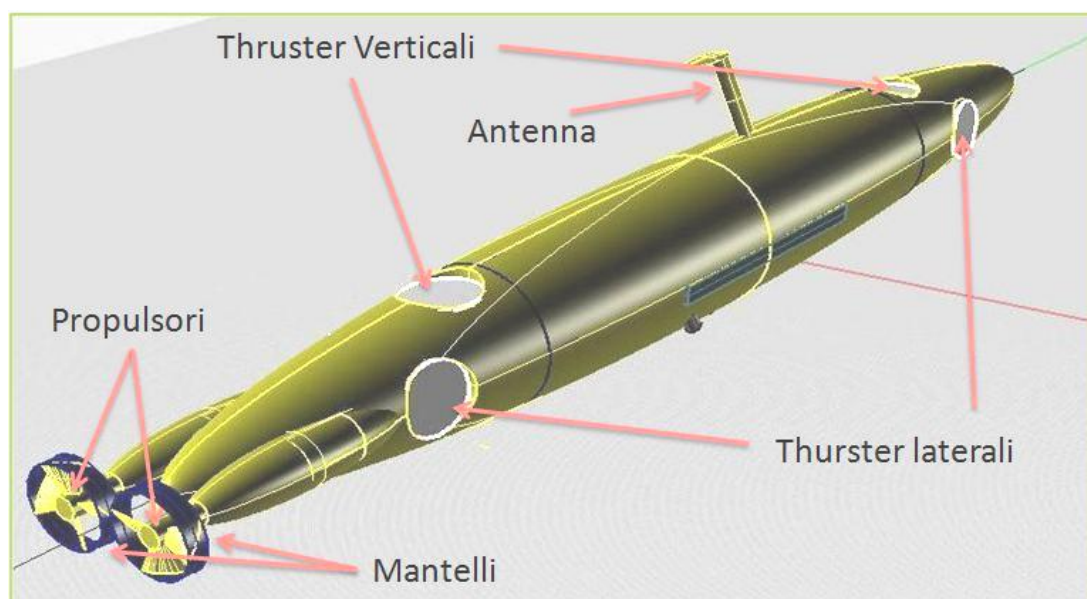
## **1.1 - Descrizione fisica**

Uno degli aspetti più discussi in fase progettuale, a causa della difficoltà progettuale sottomarina, è stata proprio la veste fisica del veicolo. Per rendere l'idea a 5 bar la valvola di una pentola a pressione si danneggia. Il veicolo immergendosi per 300 metri dovrà sopportare la pressione di 30 bar. Basta pensare che un cilindro di 260mm, per sopportare 30 bar, deve essere di carbonio con lo spessore di 7 mm, si tratta di uno spessore elevato considerando il materiale usato e viste le caratteristiche meccaniche che possiede. Inoltre tutti i dispositivi e contenitori contribuiscono al volume, allo spostamento del centro di massa e alla lunghezza e sezione del veicolo. E' stata necessaria una progettazione parallela, che coinvolgesse i responsabili delle varie parti a collaborare per unire, confermare o limitare, alle volte le dimensioni, alle volte il peso, alle volte il posizionamento della strumentazione. Il paragrafo seguente espone le principali scelte progettuali.

### **1.1.1 - Organi di movimento**

Gli organi di movimento devono essere progettati in modo da garantire l'opportuna velocità di navigazione e il funzionamento a elevate profondità. Per garantire la velocità di navigazione richiesta è necessario effettuare dei precisi studi idrodinamici volti a minimizzare ed ottimizzare la resistenza idrodinamica dello scafo. Queste stime si effettuano in un primo momento con software di simulazione e più concretamente per mezzo di prove in laboratorio. Dato che la forza di spinta dipende a suo volta dalla velocità di moto e dal fattore di forma del mezzo, occorre in un primo momento stabilirne le dimensioni e la forma così da poter conoscere il fattore di forma. Successivamente imponendo la velocità desiderata ed effettuando delle prove in acqua è stata valutata la spinta necessaria al moto. Inoltre tali stime

vengono opportunamente maggiorate in modo cautelativo rispetto a possibili modifiche in corso di realizzazione. Dopo di ciò è possibile scegliere le motorizzazioni attenendosi all'efficienza tipica di una propulsione ad elica. Nella figura 1 è visibile lo scafo del veicolo in una rappresentazione preliminare denominato scherzosamente Tifone ricordando il celebre film "Caccia a Ottobre Rosso".

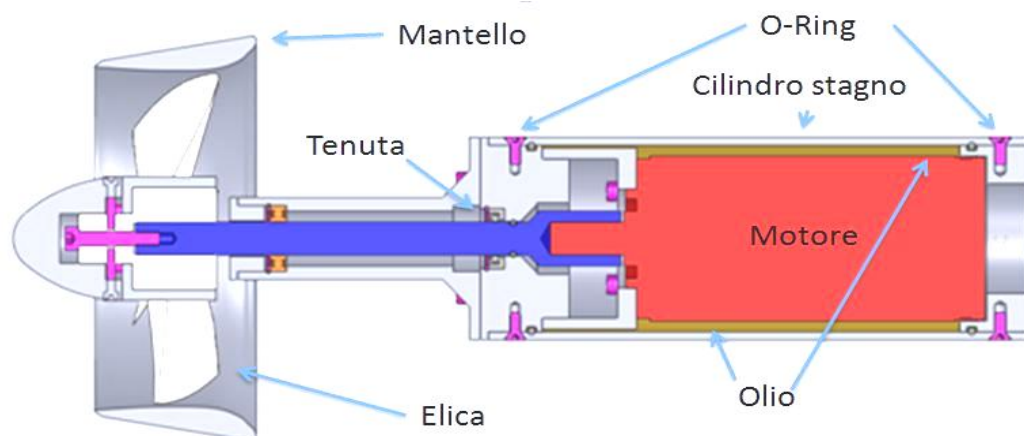


**Figura 1 Tifone**

Per la propulsione il Tifone in questione adotta un sistema ad elica Kaplan composto da sei giranti: due propulsori e due coppie intubate verticali e longitudinali per le manovre, ognuna delle quali alimentata da un motore brushless.

Le due eliche di propulsione sono alimentate ciascuna da un motore Maxon ad attacco diretto e il loro compito è fornire la spinta propulsiva, mentre le quattro restanti sono comandate ognuna con un motore Faulhaber con riduttore 1:5 e il loro compito è fornire la spinta in manovra e stazionamento. Le giranti posteriori sono intubate all'interno di un mantello, tipologia "19A", appositamente progettato per migliorarne l'efficienza e quindi la spinta generata, permettendo una buona efficienza e di raggiungere una buona velocità di navigazione. Il disegno preliminare del gruppo di propulsione è rappresentato nella figura 2 in sezione.





**Figura 2 Il gruppo di propulsione in sezione**

Il Mantello avrà dei tiranti o baffi posti a croce su di esso (non presenti nel disegno) e che lo vincolano allo scafo, donando una migliore rigidezza al propulsore proteggendo le eliche da urti e da incontri con sartie e altri materiali in sospensione durante la missione. La scelta di utilizzare due eliche di propulsione ha anche permesso di abolire, nella fase progettuale, lo studio di un timone che viene solitamente utilizzato per impostare le traiettorie di navigazione ad ampio raggio di curvatura e correggere imperfezioni o tendenze dello scafo. Nel caso in cui i propulsori lavorino in simmetria generano un'azione di traslazione orizzontale, mentre se vengono opportunamente differenziate le loro velocità di rotazione, riescono a far virare il veicolo. Il loro utilizzo sarà quello di far avanzare o arretrare il veicolo (se funzionano in senso inverso) e di farlo virare gradualmente. Probabilmente le velocità dei due assi saranno controllate in modo coordinato ad esempio con un controllo di tipo Master/Slave. I restanti gradi di libertà, attinenti al moto laterale e verticale del sommergibile, vengono ricoperti dai Thruster azimutali laterali intubati nello scafo, disposti a coppie su assi verticali e orizzontali ai due estremi della struttura e che sono stati pensati in modo che potessero essere montati e smontati con facilità, semplicemente alloggiando il cilindro che li contiene e collegandoli con un connettore.

La coppia verticale genera un moto verticale, che può essere di traslazione se lavorano in concordanza o di rotazione (beccheggio) se in discordanza. Il loro utilizzo garantisce di eseguire piccole correzioni di quota e per rotazioni di

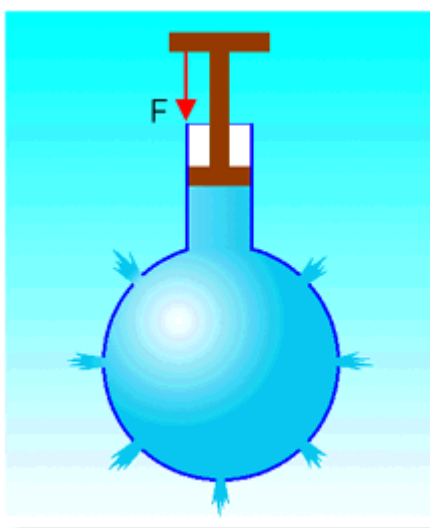
beccheggio. L'altra coppia di Thruster, orientata orizzontalmente, genera un moto di traslazione se lavorano in concordanza e di rotazione (imbardata) se in discordanza. Combinando il movimento generato sul piano con i propulsori potranno essere eseguite traiettorie di navigazione ben più curvilinee di quelle ottenibili con la sola propulsione differenziata, che garantiranno al veicolo di girare su se stesso e fermarsi precisamente per effettuare fotografie e rilievi. In conclusione la propulsione riserva il suo utilizzo principalmente nelle fasi di trasferimento e per variazioni direzionali lente, mentre i Thruster sono impiegati principalmente in manovra stretta e per lo stazionamento. Inoltre i Thruster hanno anche l'importantissimo compito di correggere le deviazioni dovute per esempio alle correnti marine, che risultano di disturbo soprattutto nelle fasi di scansione e acquisizione consentendo un miglior risultato. Per salvaguardare il funzionamento dei Thruster dai detriti presenti in mare o in generale dal materiale in sospensione soprattutto durante l'utilizzo vicino ai fondali, che potrebbe compromettere seriamente il loro funzionamento, sono presenti delle griglie di protezione all'ingresso dei tunnel. Nessun veicolo sottomarino attualmente possiede un controllo del moto in tutte le direzioni di questo tipo e per quanto riguarda il controllo della traiettoria, il tutto avviene in completa autonomia grazie ad una complessa inversione cinematica, che regola gli azionamenti in modo tale da seguire la traiettoria impostata o eventualmente ricalcolata a causa di eventi. Il sistema di controllo del movimento, oltre a far svoltare il veicolo secondo un percorso prestabilito, ha anche l'importantissimo compito di correggere in tempo reale le deviazioni provocate per esempio dalle correnti marine, così da stabilizzare e impedire derive del veicolo. Tale controllo avviene confrontando la posizione stimata con quella desiderata, inviando in tempo reale la corretta retroazione ai vari azionamenti. Questo compito di calcolo e risposta è rivestito dal pc-104 che coordina tutti gli azionamenti oltre ai vari sistemi di indagine e ricostruzione visiva.

### **1.1.2 - Progettazione per operare in alta pressione**

Un altro aspetto particolarmente complesso per la progettazione di questi mezzi sottomarini riguarda le tenute, le quali risultano inefficaci quando sottoposte a pressioni elevate come in questo caso. Le comuni tenute (o-ring) e i paraoli, sottoposti a pressioni circa uguali a 30 bar non riescono a sopportare il carico

permettendo così all'acqua di filtrare all'interno del motore e comprometterne il funzionamento. Per questo motivo è stata usata una compensazione in olio per quanto riguarda tutti i motori dell'AUV e che sfrutta il principio di Pascal che afferma:

*“ In un liquido o in un gas se si esercita una pressione in un qualsiasi punto del fluido, essa si trasmette in ogni altro punto e in tutte le direzioni con la stessa intensità” .*



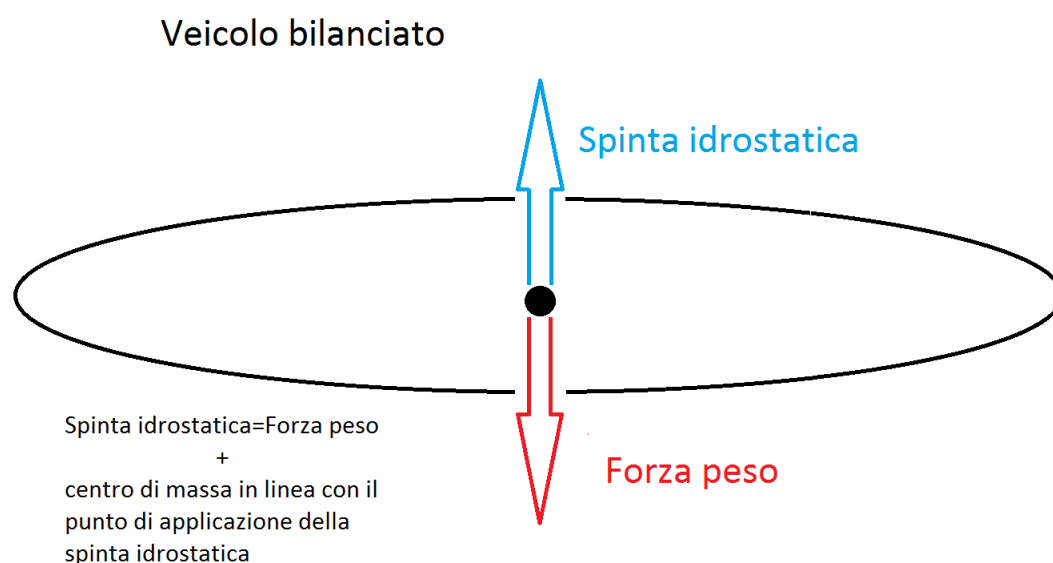
**Figura 3 Principio di pascal**

Come è possibile notare, anche nella figura 3, la pressione esercitata dal pistone la si ritrova invariata in tutte le direzioni. A tale merito i contenitori stagni dei motori elettrici per la movimentazione sono completamente riempiti di olio dielettrico (fig.2) e possiedono un piccolo condotto anulare deformabile con la pressione. Sarà proprio quest'ultimo condotto che si schiaccerà ad alte profondità e in questo modo la pressione dell'acqua viene trasferita, tramite il condotto plastico, all'olio all'interno dei contenitori stagni, in modo da compensare quella esterna esercitata dall'acqua in prossimità degli anelli di tenuta e dei paraoli. In questo modo le tenute lavorano con salti di pressione minimi tra interno ed esterno e garantiscono il corretto funzionamento delle guarnizioni impedendo all'acqua di penetrare. Il sistema medesimo può anche essere utilizzato per gli altri contenitori stagni, pensando

soprattutto alla dispersione del calore, che, in quanto ermetici e senza tenute, non dovrebbero far entrare acqua.

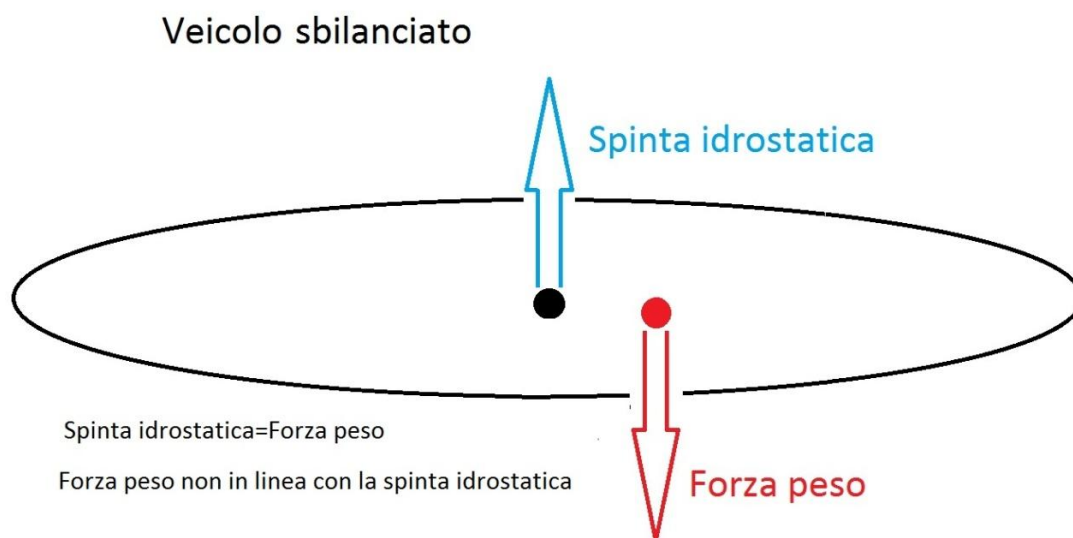
### 1.1.3 - Dimensioni, materiali e layout

Per quanto concerne le dimensioni del veicolo esse devono combinare due aspetti: da un lato consentire il completo alloggiamento delle strutture interne e dall'altro garantire un'adeguata spinta idrostatica. Infatti il volume del veicolo è rigorosamente calcolato in modo da ottenere un totale bilanciamento tra spinta idrostatica e forza peso, rendendo neutro il suo galleggiamento come nella figura 4. Per fare questo è necessario calcolare il peso totale delle strutture a bordo come somma algebrica delle singole masse e uguagliarla con la spinta di galleggiamento che dipende esclusivamente dal volume di liquido spostato dal veicolo. Nel caso in cui la forza idrostatica sia maggiore di quella peso sarà necessario ristabilire l'uguaglianza per mezzo di zavorre. Molto probabilmente verranno usati anche dei dispositivi sia a poppa che a prora per modificare di poco il volume globale del veicolo, infatti anche se l'acqua è un fluido non comprimibile, avrà densità più alte a mano che il veicolo scende in profondità. Questo permette di avere un galleggiamento stabile (mantenimento della quota) del veicolo evitando l'azione continuativa di compensazione da parte dei Thruster verticali. Un altro aspetto molto importante riguarda il bilanciamento longitudinale per una corretta postura del mezzo, descritto nelle figure 4,5 e 6 che stilizzano la forma dello scafo, postura che dipende dalla distribuzione dei pesi rispetto all'asse di spinta idrostatica.



**Figura 4 Veicolo bilanciato**

Se come detto precedentemente, la forza idrostatica eguaglia quella gravitazionale, i momenti longitudinali risultano bilanciati quando il centro di massa risulta allineato verticalmente col punto di applicazione della forza di Archimede che è pari alla spinta idrostatica.



**Figura 5 Veicolo sbilanciato**

Per questa motivo, occorre posizionare i vari contenitori in funzione della loro massa, secondo una precisa configurazione, tale da garantire un perfetto allineamento verticale tra la risultante dei pesi e il centro di galleggiamento che sarà posizionato come il centro di massa assumendo una densità media costante per l'intero veicolo. Questa configurazione viene determinata uguagliando a zero l'equazione di equilibrio dei momenti di massa rispetto al centro di spinta idrostatica. Anche per quando riguarda il bilanciamento alla rotazione assiale (rollio), occorre fare in modo che il centro di massa coincida con l'asse di galleggiamento, che per simmetria coincide con il punto mediano. Non presentando pinne di stabilizzazione del rollio ed essendo i Thruster impossibilitati a compiere tale azione, è stata studiata una soluzione che contempla un attento posizionamento delle masse tale da garantire un momento stabilizzante alla rotazione. Questo è stato possibile posizionando il centro di massa dei pesi in posizione sottostante all'asse baricentrica longitudinale in modo da creare una coppia riequilibrante quando disturbi esterni determinano effetti di rollio, o in ogni caso per far rimanere il veicolo in posizione corretta (fig.6). Tutta la

predisposizione del layout ha seguito queste ultime linee guida incontrando non poche difficoltà di accordi tra la bontà della varia strumentazione e i pesi.

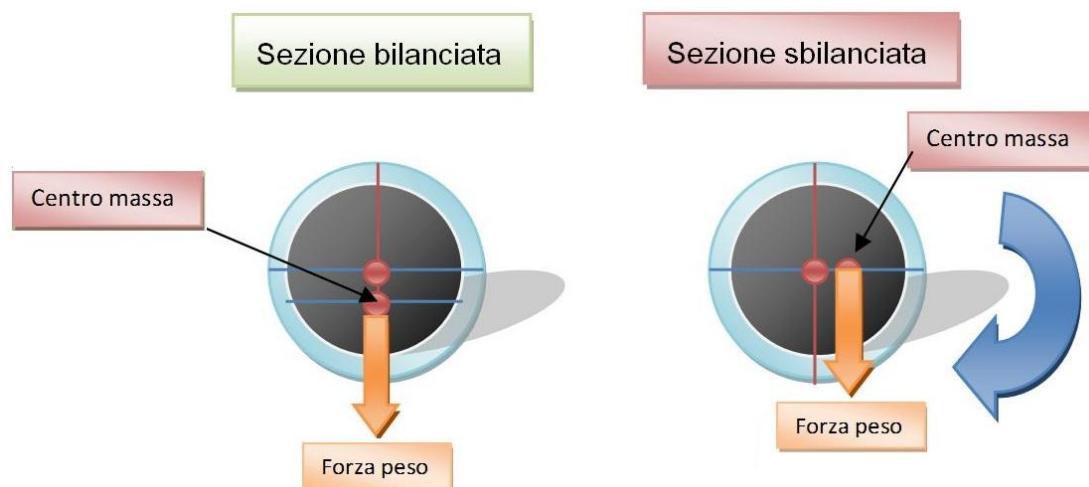


Figura 6 Centro di massa in sezione

Prendendo come riferimento una terna destrorsa dove il centro "o" coincide con il punto di applicazione della spinta idrostatica con l'asse Z rivolto verso l'alto e l'asse X verso prora è possibile scrivere il bilanciamento del veicolo come nella formula 1:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n m_i \cdot x_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n m_i \cdot y_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n m_i \cdot z_i \ll 0 \end{array} \right.$$

Formula 1 Bilanciamento delle masse

dove il punto nello spazio  $\{x_k, y_k, z_k\}$  corrisponde all'applicazione del centro di massa  $m_k$  di ogni oggetto. Lo scafo è realizzato in materiale composito con matrice in fibra di carbonio e riempito con un materiale schiumoso rigido tipo pomice per la sezione centrale e le due ogive di poppa e di prora. Per quanto riguarda le sezioni delle batterie è stato deciso di rendere stagna l'intera sezione costituita da carbonio e tappi di alluminio. Questo al fine di conseguire un'elevata resistenza necessaria per sopportare i carichi idrostatici dovuti all'elevata profondità di lavoro, abbinata alla

leggerezza tipica di questi materiali. Possiede una forma a doppia ogiva parabolica detta anche sferoide prolato, appositamente studiata per minimizzare la resistenza all'avanzamento e quindi migliorarne la sua efficienza idrodinamica. Tale peculiarità abbinata all'utilizzo di un efficiente sistema di propulsione e un pacco batterie molto capiente gli garantisce una autonomia di almeno 8 ore in Navigazione standard. Questo aspetto rappresenta un parametro fondamentale per quantificare la bontà del progetto e la sua competitività, dato che una migliore efficienza energetica consente tempi di utilizzo superiori, ma questo aspetto è stato abbondantemente trattato successivamente. Sarà inoltre presente un peso aggiuntivo sul fondo dello scafo che si sgancerà nel caso che le batterie si scarichino prima del previsto facendo tornare il veicolo in superficie. Per quanto riguarda la disposizione della strumentazione elettronica, nella sezione centrale, un layout definitivo è ancora in fase di sviluppo, ma è prevista una disposizione in barili o bicchieri stagni dal diametro di 150mm e altezza 150-170mm sigillati per mezzo di tappi stagni sui quali saranno presenti dei connettori. Questa soluzione permetterà di provare l'effettiva ermeticità di questi ultimi in apposite camere pressurizzate riuscendo così ad ottenere una prova preliminare prima della messa in acqua vera e propria. Sarebbe opportuno inserire tali bicchieri con i tappi rivolti verso il basso, costeggiati da 2 canaline contenenti rispettivamente i collegamenti di potenza e di segnale, consentendo una riduzione della quota del centro di massa e conseguentemente una maggiore stabilità al rollio della struttura in acqua. Inoltre per scongiurare innalzamenti della temperatura all'interno dei bidoni sarebbe necessaria una sede nella schiuma che non avvolgesse i bicchieri che contengono la strumentazione, ma almeno 5mm di spazio tra l'una e l'altra ottenendo in questo modo una maggiore dispersione del calore. Se questa soluzione fosse adottata consentirebbe anche una agevole regolazione delle telecamere, che potrebbero essere poste su una piccola struttura di regolazione incavata nella parte solida di fianco al bicchiere di poppa. Infine dato che sarebbe presente meno schiuma per consentire anche una facile connessione sui tappi dei barattoli, il punto di azione della spinta idrostatica si alzerà riducendo la possibilità di rollio e aumentando la stabilità della struttura. Nella figura 7 il Tifone spoglio.



Figura 7 Tifone senza scafo

## **1.2 - Descrizione elettrica**

Uno degli elementi essenziali che contraddistingue qualsiasi oggetto tecnologicamente avanzato al giorno d'oggi è l'elettronica. Quest'ultima fa' sempre più parte della nostra vita quotidiana aiutandoci nei compiti di ogni giorno quasi inconsapevolmente e rendendo le classiche cose da fare estremamente facili.

Il sottomarino in questione adotta le più avanzate tecnologie elettroniche. Sia di interfaccia con il mondo esterno, quindi sensoristica avanzata, sia di elaborazione dati invidiata anche dai calcolatori moderni, sia per quello che riguarda i motori elettrici di ultima generazione con controllo elettronico ad alto rendimento e infine le principali e innovative tecnologie di comunicazione senza fili.

Il Principio della modularità è rispettato anche sull'elettronica; infatti, con il progredire sempre più veloce delle tecnologie, si è pensato bene di poter intervenire in qualsiasi momento per un aggiornamento della strumentazione, delle schede elettroniche e anche dei singoli componenti installati su di esse. Ma anche per interventi di riparazione che potrebbero essere necessari.

Nei paragrafi seguenti si descriveranno i componenti elettrici ed elettronici installati.

### **1.2.1 - Strumentazione**

Un veicolo della classe AUV deve necessariamente integrare strumentazione per il controllo della traiettoria e propulsori, per la comunicazione, e per il compito al quale deve far carico. In successione le classi di appartenenza sono state descritte brevemente ma, per ogni approfondimento alla singola strumentazione, si rimanda al datasheet [1]. Sarà consigliato disporre i cilindri, che in realtà sono dei bicchieri, nella sezione centrale con il tappo verso il basso riducendo ulteriormente la quota del centro di massa e facilitando l'accesso per il settaggio dell'angolo delle videocamere, come esposto precedentemente. Inoltre essendo tutti i tappi a contatto con l'acqua, nella sezione di accesso ci sarà una notevole riduzione della schiuma che alzerà il punto di azione della spinta di Archimede aumentando la stabilità al rollio della struttura. Tutti gli elementi della strumentazione saranno inoltre collegati tra loro



tramite due canaline, che faranno capo ai connettori sui tappi, poste lateralmente ai cilindri e resinate, una di potenza con le alimentazioni e una di segnale. Anch'esse probabilmente disposte verso il basso e che contribuiranno alla stabilità totale del veicolo.

### 1.2.1.1 Strumentazione per la traiettoria

La strumentazione per il controllo della traiettoria dovrà, ad ogni modo, ricreare via software la posizione del sottomarino commettendo l'errore più piccolo possibile probabilmente eseguendo un reset sulla posizione tramite alcuni sensori come il magnetometro. E' riportato l'elenco della strumentazione in tabella 1.

Sensori per la traiettoria																
Strumentazione			Interfacce				Caratteristiche									
N	Tipo	Modello	USB	RS232	LAN	CAN	Profondità operativa [m]	Peso in aria [g]	Peso in acqua [g]	Fr. di lavoro	Bit rate	L [mm]	H [mm]	P [mm]	Φ [mm]	Alimentazione [V]
1	Profondimetro	PA200-PA500	\	1	\	\	700	1100	800	200-500KHz	0,7a50m-0,1a10	160	\	\	47	12..24
2	DVL	Teledine RD	\	1	\	\	300			614KHz	12Hz	300	\	\	125	12..24
3	Piattaforma inerziale	MTI-G	1	1	\	\	0	68	40	NC	512Hz	58	58	33	\	5..30
4	Bussola	OS5000	1	1	\	\	0	2	<2	NC	40Hz	30	30	5	\	3,3
5	Modulo GPS	GPS-330R	1	\	\	\	0	14		1191-1278-1575Mhz	Nc	34	34	8,6	\	3,8-8,0

Tabella 1 Caratteristiche strumentazione per la traiettoria

Il profonditàmetro (fig.8) fornisce l'indicazione sulla distanza dalla superficie 1-100m e abbinato ad un trasduttore di pressione anch'esso posto sulla superficie a contatto con l'acqua che, trasforma la pressione applicata su tale superficie in un segnale elettrico, effettua una stima della quota di immersione. La marca è tritech international. La sua frequenza operativa è di 200-500kHz a seconda del modello. Il peso è di 1,1kg in aria e 0,8kg in acqua.

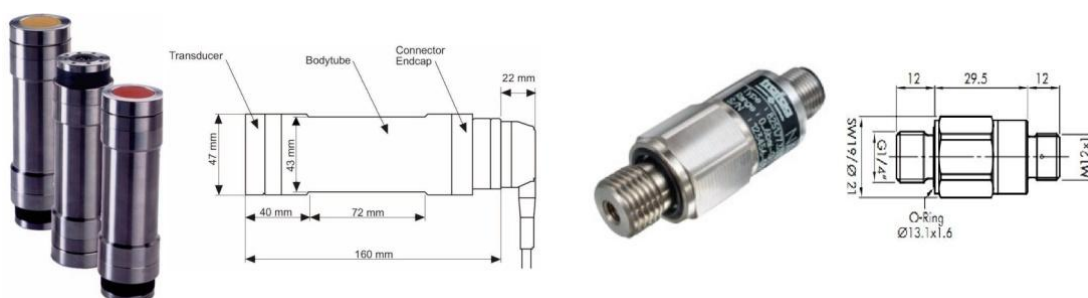
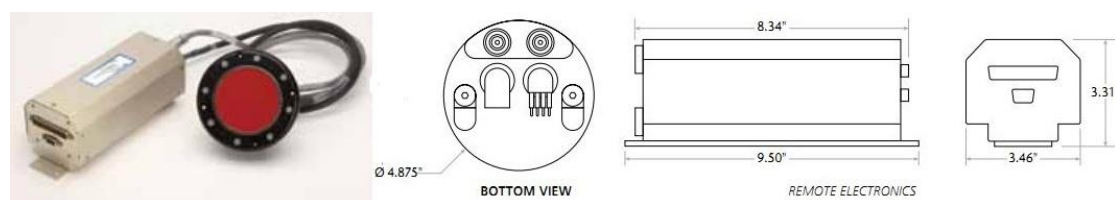


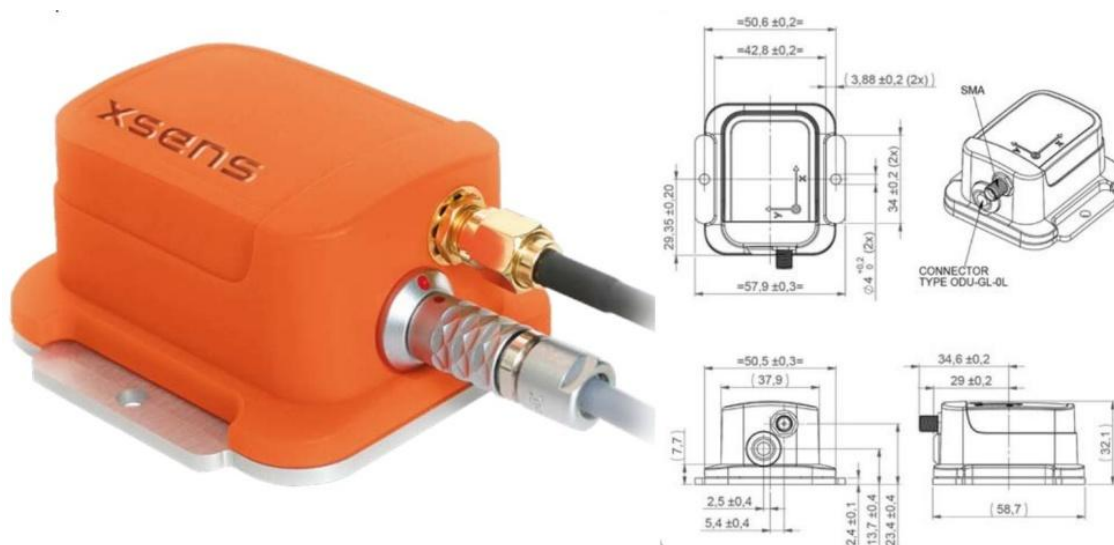
Figura 8 Profondimetro Sx e trasduttore di pressione Dx

Il Doppler velocity log (DVL fig.9) fornisce l'indicazione dell'avanzamento tramite effetto doppler. La marca scelta è Teledine Rd instrument navigation. La frequenza operativa è 614kHz con un ping di 12Hz massimi. Il costo veramente proibitivo di questo oggetto ha costretto la progettazione a l'installazione su un solo veicolo.



**Figura 9 Doppler velocity log**

Piattaforma inerziale (fig.10) che contiene l'accelerometro, il giroscopio e il magnetometro. Questi strumenti sono integrati in un solo oggetto della X-sense. L'oggetto in questione viene utilizzato per varie applicazioni dal navale, come in questo caso, all'aeronautica, alle corse automobilistiche.



**Figura 10 Piattaforma inerziale**

Magnetometro della Oceans (fig.11) server è una piccola scheda elettronica quadrata di 2-3cm dal peso di 2-3g che consente di interfacciare alcuni dei sensori e tramite porta usb, rs232 o logica ttl allacciarsi al calcolatore. Possiede un programma

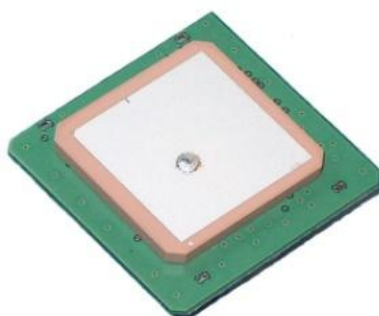
proprietario che consente l'orientamento nello spazio in tutti e 6DOF tramite i dati avuti dalla piattaforma inerziale.



**Figura 11 Magnetometro**

## 5. Modulo GPS

Consente di poter sapere la posizione del sottomarino quando è in superficie. Viene inserito ormai in molti dispositivi elettronici di uso comune come navigatori cellulari e anche in alcune macchine fotografiche fornendo informazioni del luogo dello scatto. Tramite il sistema satellitare GPS e la triangolazione dei segnali sincronizzati tra loro consente di sapere esattamente la propria posizione nel mondo. Consente inoltre di fare un reset degli errori di navigazione una volta che il sottomarino sale in superficie.



**Figura 12 Modulo Gps**

### 1.2.1.2 Strumentazione per la comunicazione

La comunicazione quando è immerso deve avvenire sia tra i vari sottomarini sia con l'unità in superficie, inoltre deve avvenire per il recupero dati ad alta velocità e per il recupero dello stesso. Tra i sottomarini avviene tramite modem acustici a bassa frequenza e per questo è probabile che in un secondo studio non vengano utilizzati i classici riduttori ma riduttori magnetici in quanto durante le prove dei motori (Vedi capitolo 4) era percepibile un suono compatibile con le frequenze di lavoro di strumentazione. La comunicazione con l'esterno per il recupero dati avviene tramite wireless e inoltre sarà dotato di ricetrasmittitore radio e GPS. La strumentazione nel dettaglio in tabella 2:

Comunicazione															
Strumentazione			Interfacce				Caratteristiche								
N	Tipo	Modello	USB	RS232	LAN	CAN	Profondità operativa[m]	Peso in aria [g]	f di lavoro	Bit rate	L [mm]	H [mm]	P [mm]	Φ [mm]	Alimentazione [V]
1	Modem acustici	S2CR 18/34	\	2	1	\	1000	1390	48...78KHz	31,2 Kbit/s	260	\	\	100	24
2	Radio	Gsm	Inclusa nel pc 104				0.2	Nc	1900 MHz	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc
3	Wireless	Pico station	\	\	1	\	0.1	100	2,4GHz	54 Mbps	136	20	39	\	24
4	Flesch xeno	Teledine	Sconnesso				0.1	Nc	0,5Hz	0	Nc	Nc	Nc	Nc	Nc

**Tabella 2** Caratteristiche strumentazione di propulsione

I modem acustici (fig.13) acronimo di modulation-demodulation trasmettono dati emettendo suoni. Sono l'unico sistema di trasmissioni dati quando si è immersi in un fluido denso come l'acqua che attenua qualsiasi onda elettromagnetica, di alta frequenza, che cerca di propagarsi al suo interno. Un oggetto dal costo elevato, ma che rende possibile la comunicazione tra i veicoli sottomarini e consente la stima della posizione relativa.



**Figura 13** Modem acustici

Al giorno d'oggi una piccola scheda GSM consente sia di trasmettere che ricevere segnali. Un buon compromesso per la comunicazione a distanza medio lunga a bassa velocità. Questo oggetto è integrato nel pc/104, consentirà anche una chiamata per il recupero con invio delle proprie coordinate avute con il GPS.

La scheda wireless (fig.14) anche questa spesso di pochi cm è integrata nei dispositivi elettronici di maggior consumo e consente la comunicazione a breve distanza ad alta velocità. La scheda che è stata usata emette 1W effettivo abbastanza potente da non aver problemi anche con l'antenna immersa per circa 100mm. Consentirà di scaricare i dati acquisiti dal sottomarino in modo veloce, semplice e senza dover collegare alcun cavo, fare settaggi e modifiche software. Probabilmente si userà uno standard di comunicazione di ultima generazione per applicazioni Embedded. Brevettato e riconosciuto nel 2005 lo standard 802.15.4 chiamato ZIGBEE rappresenta molte novità migliorative nelle reti a più nodi riducendo ulteriormente i consumi e massimizzando la trasmissione dati.



**Figura 14** Modulo wireless

Flash Xenon: si tratta di un dispositivo autonomo da installare sulla scocca al sottomarino. Di notte emette dei flash di luce ad alta intensità e consentirà di avvistarlo sia per il recupero sia nel caso in cui una imbarcazione si avvicini al sottomarino.

### **1.2.1.3 Strumentazione per la missione**

In questa categoria rientrano tutti gli strumenti che raccolgono i dati non strettamente necessari alla navigazione, ma che sono necessari al compito designato al progetto. Per il profilo di missione i Tifoni devono riuscire a mappare il fondale e in una realtà

tridimensionale virtuale sarà possibile orientarsi come in alcuni giochi, che ricreano paesaggi, di ultima generazione. Anche in questo caso sono stati scelti componenti tecnologici e l'elaborazione finale consentirà di esplorare il fondale in un modo moderno e che darà un colpo d'occhio immediato su quello che sarà il fondale scansionato. Per fare ciò sono stati pensati tre profili, che riguardano i tre Tifoni chiamati simpaticamente Quì, Quo e Qua, e che li caratterizzano in base alla strumentazione in loro possesso. Quì sarà dotato di scansonar; Quo di camere, illuminatori e laser; Qua del DVL.

Missione															
Strumentazione			Interfacce				Caratteristiche								
N	Tipo	Modello	USB	RS232	LAN	CAN	Profondità operativa [m]	Peso in aria [g]	Peso in acqua [g]	f di lavoro	L [mm]	H [mm]	P [mm]	Φ [mm]	Alimentazione [V]
1	Laser	Underwater	Connettore proprio				3000	500	300	NC	90	\	\	30	24
2	Luci	LED-1600	Connettore proprio				3000	460	240	6600°K	89	\	\	76-31,25	24
3	Telecamere	Divecam 550C	Connettore proprio PAL-NTSC				300	163	95	50-60Hz	169	\	\	31	12
4	Scansonar	Tritech	\	1	\	\	4000	5300	4300	325-675KHz	500	30	40	\	18..36
5	Elaborazione dati	IS-377	6	2	1	PAL	0	100	NC	2,9GHz	146	101	30	\	9..24

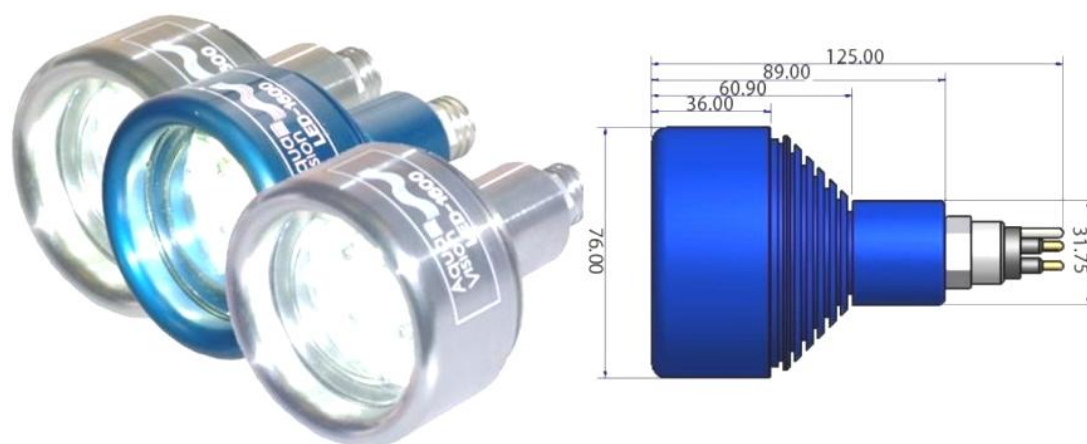
**Tabella 3** Caratteristiche strumentazione di missione

Il laser (fig.15) montato a prora, solca il terreno tracciando una linea ortogonale al moto. Successivamente la telecamera posta a poppa con un'inclinazione precisa legge la luce laser, che verrà sagomata da ogni forma che incontra, e la commuta nello spazio di visualizzazione tridimensionale.



**Figura 15** Laser

Gli illuminatori LED (fig.16) di ultima generazione hanno una vita di 100.000 ore, un'angolo di apertura di 30°, flusso luminoso di 1600lumen con temperatura di colore 6600°K e con un consumo di 1,6A a 24V. Consentiranno alle telecamere di poter abbinare i colori alle superfici.



**Figura 16 Illuminatori led**

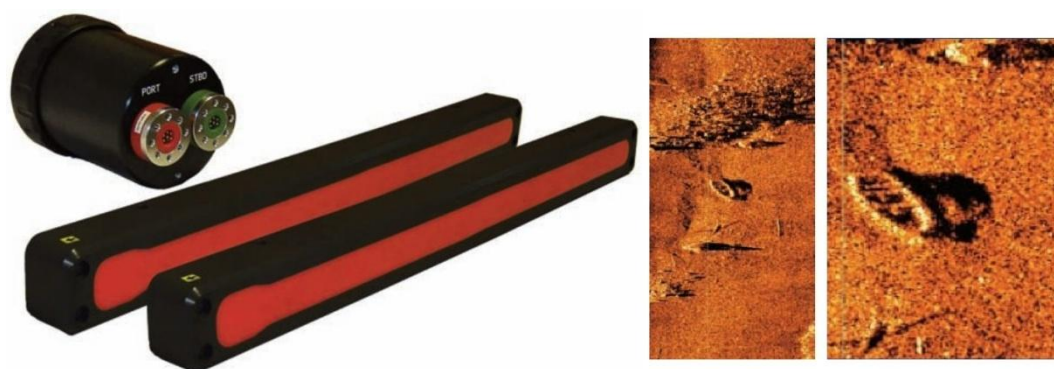
Le telecamere (fig.17) per acquisizione video, con un possibile sviluppo futuro per l'inseguimento della traiettoria, sono oggetti essenziali per ricreare il sito sommerso. La bontà di queste telecamere sta nel rapporto segnale/rumore estremamente alto e nell'ottica di qualità che essendo di grandi dimensioni raccoglie molta luce risultando facilmente impressionabile fino a 0,1Lux e apertura focale  $f=2.0$ . Il modello opzionale presenta una resistenza alla pressione di 300m con massa di 163g in aria e 95g in acqua.



**Figura 17 Camera**

Gli scansonar (fig.18) sono delle sbarre di mezzo metro a sezione quadrata. Emettono e ascoltano onde elettromagnetiche a 325-365KHz sondando il fondale. Pesano 5,3Kg in aria e 2,7kg in acqua. Consentono di individuare il sito archeologico anche

a 20 metri di distanza e soprattutto in assenza di luce o con pulviscolo in sospensione.



**Figura 18 Scansonar e immagini prodotte**

L'unità di elaborazione dati è una scheda madre LS-377 che supporta un socket rPGA988 da pc portatile. Il notevole carico di lavoro, il margine di ampliamento operativo e la volontà di avere a disposizione una unità potente ed efficiente di calcolo ha spinto la progettazione nella direzione di avere il migliore processore in commercio. Monta un processore quadcore, tecnologia di produzione a 45nm, intel i7-740QM a 2,93GHz con turboboost attivo che consente di risparmiare energia quando il carico di lavoro lo permette e dissipa 45W di punta massima. Sarà abbinato a 4Gb di memoria ram a 1066MHz. Il multithread permette la virtualizzazione di 8 core con conseguente smistaggio dei calcoli per le varie applicazioni e disabilitazione di un core quando possibile. L'archiviazione è fatta con 1 Hard disk da 2,5" da 1Tb a 7200rpm a basso consumo(3-4W). Questa unità sarà collegata alle 2 camere e agli scansonar. La dissipazione del calore probabilmente verrà effettuata con un waterblok comprensivo di pompa sul socket e un'altro sul tappo del cilindro stagno in modo da dissipare il calore verso l'esterno.



**Figura 19 Scheda madre per elaborazione dati**



### 1.2.1.4 Azionamenti e propulsione

Più nel dettaglio il movimento eseguito esclusivamente tramite motori elettrici brushless ad alto rendimento, sono azionati da azionamenti(driver) che fanno da moduli di potenza e controllo descritti approfonditamente nel capito 3. Questi ultimi controllati da un'unità centrale o vital computer, il pc104, che impartisce comandi di velocità o coppia con interfaccia CAN bus. La tabella 4 chiarisce le principali caratteristiche di questa ultima strumentazione adottata.

Propulsione													
Strumentazione			Interfacce				Caratteristiche						
N	Tipo	Modello	USB	RS232	LAN	CAN	Profondità operativa [m]	Peso in aria [g]	L [mm]	H [mm]	P [mm]	Φ [mm]	Volt [V]
1	Pc/104	Plus	1-3	4-2	4	1	0	100	96	90	Nc	\	5
2	Driver	Elmo10/60	\	1	\	1	0	50	55	15	46	\	12..48
3	Thruster	Faulhaber	Sensori Hall e fasi				0	750	105	\	\	44	48
4	Propulsione	Maxon	Sensori Hall e fasi				0	2450	170	\	\	60	48

Tabella 4 Caratteristiche strumentazione propulsione

Il controllo del moto desiderato è effettuato da questo piccolo e leggero oggetto (fig.20)descritto nel capitolo 3. Questo oggetto è lo stadio di potenza che comanda i motori con un rendimento del 99% effettuando un controllo in retroazione molto preciso. Consente un'interfaccia con seriale e CAN, quest'ultimo utilizzato e sviluppato proprio per applicazioni automotive.

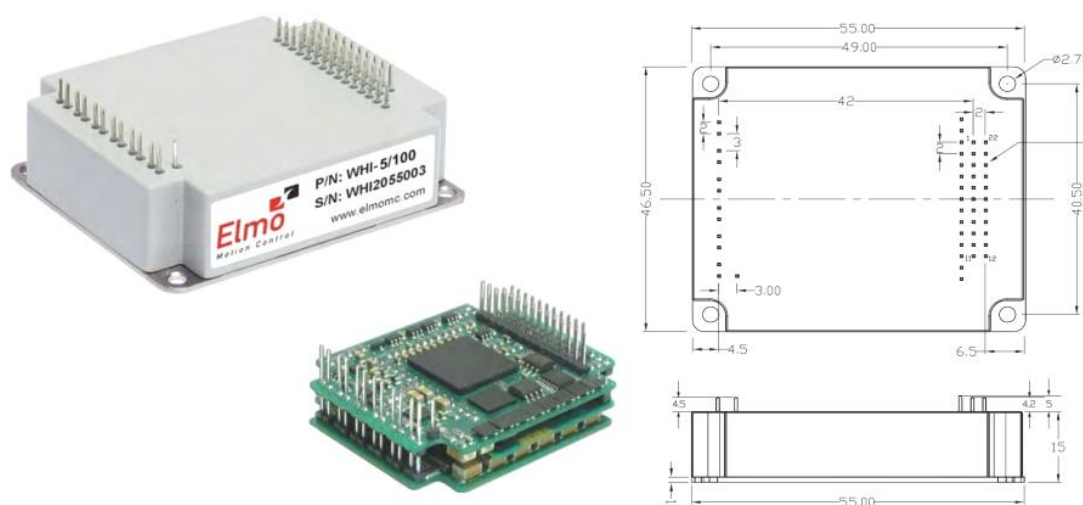


Figura 20 Azionamento Elmo

I motori brushless (fig.21) sono ad alte prestazioni ed integrano dei sensori ad effetto Hall che consentono di individuare la posizione dell'albero e con semplici operazioni matematiche può essere ricavata velocità e accelerazione. Questi motori necessitano, ad ogni modo, di una commutazione elettronica e per questo stanno avendo ampio utilizzo nell'automazione solo in questi anni in cui l'elettronica, per il controllo, ad alta concentrazione è sempre più disponibile a basso costo. Questi motori hanno un magnete sul rotore e vengono chiamati macchine sincrone (P.M.S.M. acronimo di Permanent Magnet Synchronous Motor) in quanto non presentano alcuno scorrimento tra esso e il campo magnetico rotante generato dallo statore. Il campo magnetico rotante generato dallo statore, con 3 avvolgimenti disposti a  $120^\circ$  l'uno dall'altro, ha necessariamente bisogno di sapere dove si trova il rotore per essere generato e creare una coppia tra i poli del magnete del rotore e il campo magnetico generato sullo statore. Ottenendo, così, sempre la massima coppia per ogni regime di rotazione. Per questo sono necessari i sensori Hall. Chiaramente sarebbe possibile parlare abbondantemente di questi motori, come per ogni tipo di strumentazione utilizzata, ma è stato scelto di fare una descrizione sommaria.

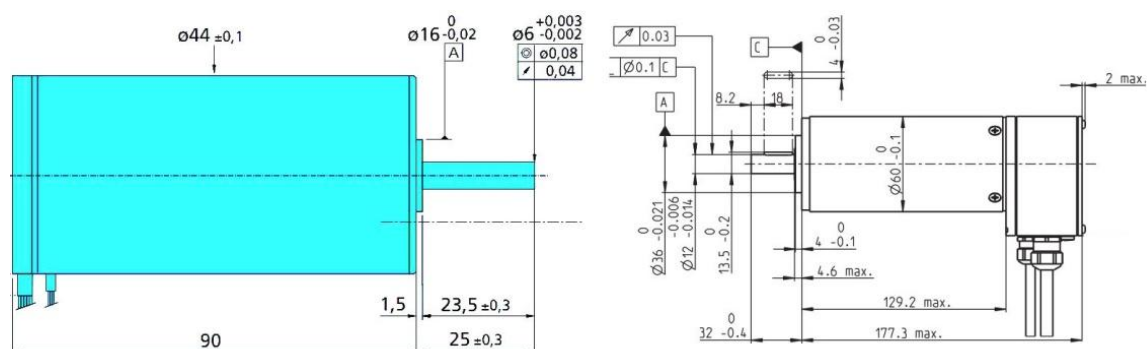
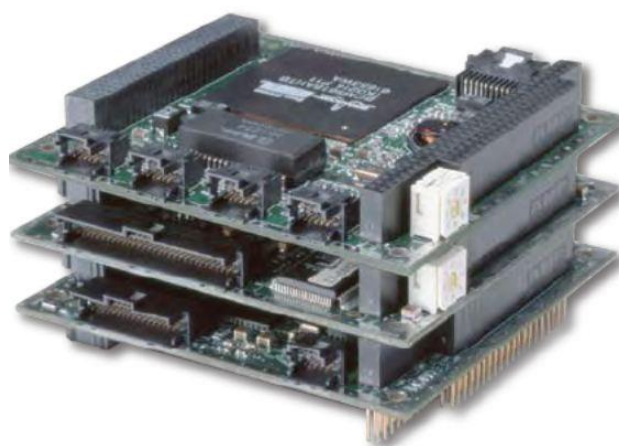


Figura 21 Faulhaber a Sx e Maxon a Dx

### 1.2.1.5 Il computer vitale pc/104

Anche detta "unità vitale" il PC/104 (fig.22) rappresenta una miniaturizzazione di un personal computer con standard industriali quindi resistente a gradienti di temperatura notevoli, temperature di esercizio abbondanti ( $-30,+80^\circ\text{C}$ ) e con

saldature più resistenti alle sollecitazioni meccaniche come vibrazioni e urti. E' pensato per applicazioni industriali create su misura e consente una programmazione a 360°, con un formato standard di 96x90mm nella versione plus e la possibilità di ampliamento di varie schede di I/O poste parallele alla scheda madre formando vari strati ma rimanendo di dimensioni ragionevoli. In questa applicazione avrà il compito di ricreare una traiettoria desiderata. Questo compito è stato appositamente fatto calcolare ad un'altra unità sconnessa alla scheda madre per la missione di acquisizione video consentendo ampliamenti futuri sconnessi dal controllo del moto e semplificando in ogni caso una modifica del progetto originale per altre applicazioni. Saranno collegati a questa unità tutti i sensori per la creazione della traiettoria e comanderà indirettamente i motori tramite un'operazione matematica matriciale.



**Figura 22 Un PC/104 plus**

## 1.2.2 - Potenza necessaria

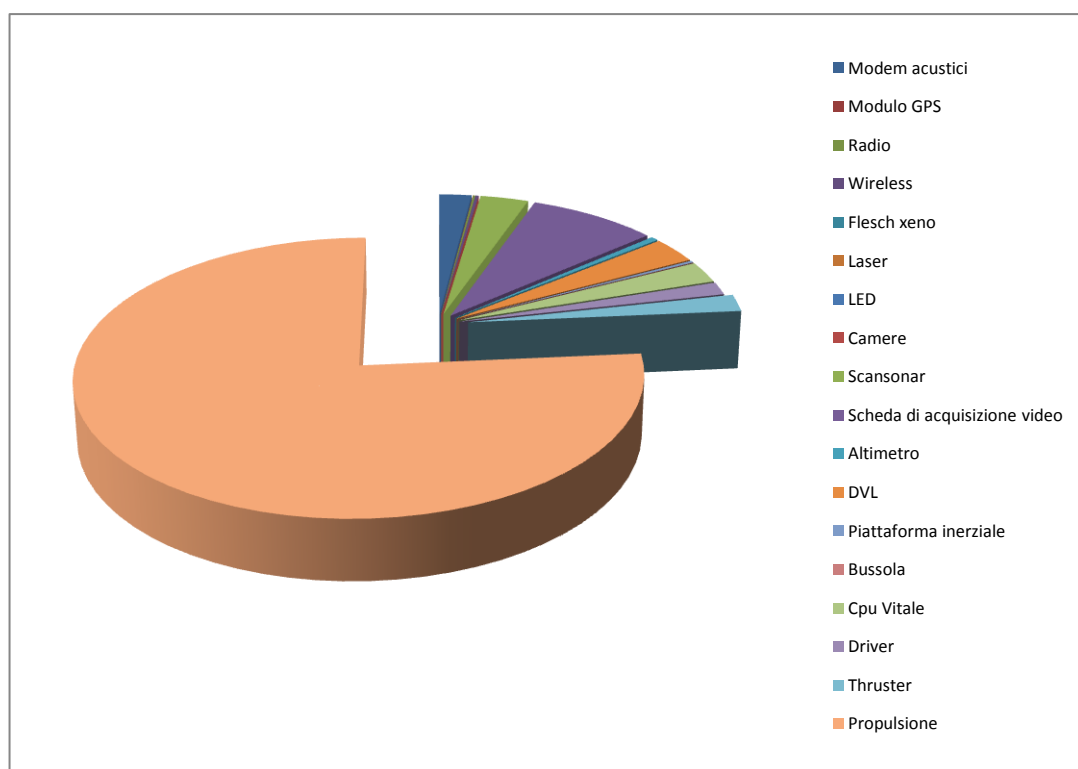
Caratterizzazione importante di veicoli elettrici: il consumo. Ogni tipo di decisione è stata pensata cercando di limitare i consumi e cercando di ottenere la minore dispersione di energia. In tab.5 è stata fatta una stima dei consumi.

Strumentazione				Caratteristiche								
Tipologia	N	Tipo	Modello	Alimentazione [V]	Corrente [A]	Consumo [Wh]	N°	Profilo ricerca	Profilo raccolta dati	Stima ricerca [Wh]	Stima raccolta dati [Wh]	
Comunicazione	1	Modem acustici	S2CR 18/34	24	0,33	8	1	1	1	8	8	
	2	Modulo GPS	GPS-330R	3,8-8,0	0,045	0,171	1	0,5	0	0,086	0	
	3	Radio	Gsm cp/104	5	0,2	1	1	0,5	0	0,5	0	
	4	Wireless	Picostation	24	0,33	8	1	0,1	0	0,8	0	
	5	Flesch xeno	Teledine	1,5	0,1	Batteria Propria	1	0	0	0	0	
Missione	1	Laser	Underwater	24	0,25	6	1	0	1	0	6	
	2	LED	LED-1600	24	1,6	38,4	2	0	1	0	76,8	
	3	Camere	Divecam 550C	12	0,13	1,56	2	0	1	0	3,12	
	4	Scansonar	Tritech	18..36	0,5 (a24V)	12	1	1	1	12	12	
	5	Scheda di acquisizione video	IS-377	9..24	2,7 (a24V)	65	1	0,5	1	32,5	65	
Sensori traiettoria	1	Altimetro	PA200 PA500	12..24	0,160..0,080	1,92	1	1	1	1,92	1,92	
	2	DVL	Teledine RD	12..24	1..0,5	12	1	1	1	12	12	
	3	Piattaforma inerziale	MTI-G	5..30	0,037 (a24V)	0,91	1	1	1	0,91	0,91	
	4	Bussola	OS5000	3,3	0,02	0,066	1	1	1	0,066	0,066	
Propulsione	1	Cpu Vitale	Pc 104 plus	5..12	1	10	1	1	1	10	10	
	2	Driver	Elmo10/60	12..48	0,02	1	6	1	1	6	6	
	3	Thruster	Faulhaber	48	4,16	200	4	0,01	0,1	8	80	
	4	Propulsione	Maxon	48	4,16	200	2	0,75	0,5	300	200	
										TOT	392,8	481,8
										ORE[h]=	9,675	7,887
										+5%	10,2	8,3

Tabella 5 Stima dei consumi

Ogni elemento è stato scelto in modo ottimizzato massimizzando il rendimento. La tabella mostra il consumo di ogni elemento installato e dei coefficienti di utilizzo

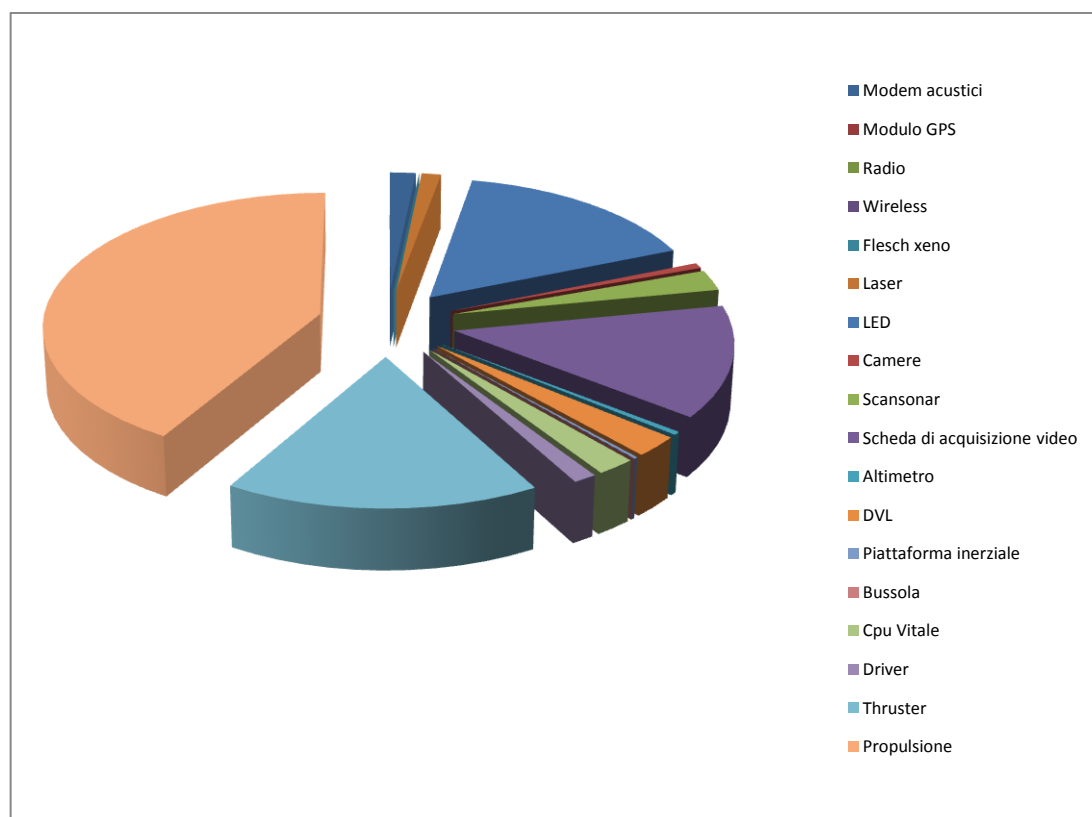
stimati secondo un profilo di missione ben preciso. Sono stati pensati 2 profili: uno di ricerca del sito archeologico e uno di raccolta dati. Il profilo di ricerca avrà quindi con un coefficiente di utilizzo della strumentazione per l'acquisizione dati pari a 0,5 in quanto la potenza di calcolo richiesta non è eccessiva dato che le camere, i laser e i led sono spenti e dovrà immagazzinare solo i dati dello scansonar, ma con coefficiente per la propulsione alto. Il profilo di raccolta dati non avrà coefficiente di propulsione alto, ma in compenso avrà tutta la strumentazione per la missione accesa e con un coefficiente quindi pari a uno. Tali coefficienti rappresentano solo una stima per valutare approssimativamente la durata globale del sistema, ma sarà necessaria una stima più approfondita una volta che saranno definitivi i profili dei vari veicoli. E' possibile ottenere una valutazione dei consumi guardando il grafico relativo (fig.23,24).



**Figura 23** Grafico a torta dei consumi del profilo di ricerca

Il grafico a torta per il profilo di ricerca (fig.23) mette in risalto la generosità dell'energia globale destinata alla propulsione. Un altro grafico a torta (fig.24) descrive le porzioni di energia destinate alla stima di utilizzo nel profilo di acquisizione dati. Come si può notare dal grafico è stata destinata molta meno

energia per la propulsione del veicolo ed aumentata quella destinata alla manovra in quanto una volta trovato il sito sarà necessario percorrere cerchi concentrici.



**Figura 24 Grafico a torta dei consumi del profilo di raccolta dati**

Attualmente sarà possibile effettuare una semplice stima approssimativa di durata delle batterie (che sono state già scelte da  $48 \times 80 = 3800 \text{Wh}$  nominali) in base a questa tabella interpolando, se necessario, i due profili. Per esempio se si pensa che per raggiungere e individuare un sito già scoperto precedentemente si occupa il 50% del tempo nei due profili, la durata delle batterie si avrà interpolando al 50% la differenza tra 10,3 e 8,2 ore in quanto le batterie non si scaricheranno alla potenza nominale ma molto più lentamente e di conseguenza dureranno il 5% in più come è descritto più avanti. Perciò avremo una durata di circa 9 ore.

### 1.2.3 - Schema connessioni

Una visualizzazione rapida della strumentazione nelle sezioni è data dalla tabella 6.

Sezioni	Strumentazione	Modello	L[mm]	H[mm]	P[mm]	Φ[mm]
Poppa	M1 Motore propulsione Master	Maxon 400w	170	\	\	60
	M2 Motore propulsione Slave	Maxon 400w	170	\	\	60
	M3 Thruster verticale	Faulhaber 200W	105	\	\	44
	M4 Thruster orizzontale	Faulhaber 200W	105	\	\	44
Pacco batterie poppa	Batteria 48V	Li-Po	55	15	46	\
	Driver M1	10/60	55	15	46	\
	Driver M2	10/60	55	15	46	\
	Driver M3	5/60	55	15	46	\
	Driver M4	5/60	55	15	46	\
Centrale	Modem acustici	S2CR 48/78	260	\	\	100
	Modulo GPS	GPS-330R	34	34	8,6	\
	Radio	Gsm integrato	Integrata nel pc 104			
	Wireless	Picostation	136	20	39	\
	Camere*	Divecam 550C	169	\	\	31
	Scansonar*	Tritech	500	30	40	\
	Elaborazione dati	IS-377	146	101	30	\
	Profondimetro	PA200-PA500	160	\	\	47
	Base inerziale	MTI-G	58	58	33	\
	Bussola	OS5000	30	30	5	\
	Pc/104	104 Plus	95	95	>20	\
Pacco batterie prora	Batteria 48V	Li-Po	217	120	230/260	\
	Batteria tampone 24V	Li-Po	65	96	30	\
	Driver M1	5/60	55	15	46	\
	Driver M2	5/60	55	15	46	\
	DVL*	TeledineRD	300	\	\	125
Prora	Flesch xeno	Teledine	Nc	Nc	Nc	Nc
	M3 Thruster verticale	Faulhaber 200W	105	\	\	44
	M4 Thruster orizzontale	Faulhaber 200W	105	\	\	44
	Laser*	Underwater	90	\	\	30
	Illuminatori LED*	LED-1600	89	\	\	76-31,25









Tabella 6 Tabella della strumentazione nelle sezioni.

\*Dove il modello lo prevede.

In questo paragrafo si descriverà con uno schema preliminare la sezione ogivale di poppa, la sezione del pacco batterie di poppa e successivamente alla sezione centrale la sezione del pacco batterie di prora, infine la sezione ogivale di prora.

La legenda sottostante (fig.25) indica dei valori di sezione minima per ogni tipo di linea che caratterizzerà l'impianto elettrico. Una valutazione più approfondita verrà fatta per le fasi dei motori sapendo l'effettiva massima corrente erogabile nei possibili cambi di direzione stimati nel tempo, ovvero dove il motore assorbe notevolmente di più in quanto in parte i cavi saranno immersi nella schiuma, che fa da struttura allo scafo, riducendo la dispersione termica. Inoltre andranno valutati caso per caso i cavi sottomarini disponibili e di conseguenza scegliere i più adatti riguardo alle connessioni per soddisfare lo scopo previsto. Di seguito alla legenda è stata fatta una rappresentazione a blocchi di massima delle connessioni e della strumentazione necessaria nelle varie sezioni del veicolo.

### Legenda

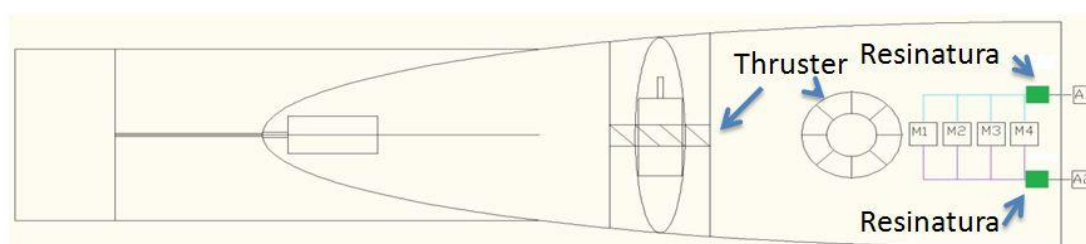
	cavo sottomarino 2x1mm <sup>2</sup> 24V
	cavo sottomarino 4x1,5mm <sup>2</sup> 48V e carica
	cavo sottomarino 5x0,1mm <sup>2</sup> Hall
	cavo sottomarino 3x0,1mm <sup>2</sup> Seriali
	cavo sottomarino schermato CAN 3x0,1mm <sup>2</sup>
	cavo sottomarino 3x0,5mm <sup>2</sup> Fasi
	cavo sottomarino 2x1mm <sup>2</sup> 15V
	cavo sottomarino 3x0,5mm <sup>2</sup> 5V

**Figura 25** Legenda dei cavi da usare nelle sezioni del tifone

La sezione di poppa (fig.26) è spoglia di qualsiasi tipo di strumentazione in quanto deve necessariamente contenere i motori che creano un importate momento per la stabilità del veicolo che dovrà essere compensato con strumentazione disposta a prora. La sua lunghezza è ancora da valutare e disegnare. I blocchi verdi sono delle resinature che contengono i collegamenti elettrici ed evitano che la pressione che agisce sulla guaina del cavo, che parte dal connettore, faccia trafilare qualche goccia d'acqua. Saranno presenti ogni volta che ci sarà un connettore. Si è scelto di installare un connettore di potenza e un connettore di segnale per evitare che i chopper del

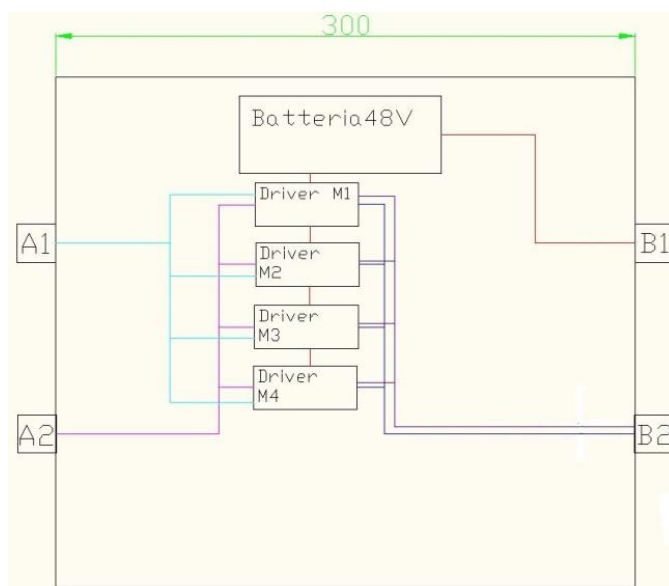


driver emettendo forti variazioni di tensione e corrente che si potrebbero accoppiare, come disturbo sicuramente considerevole, al segnale di corrente dei sensori Hall.



**Figura 26 Sezione di poppa schematica**

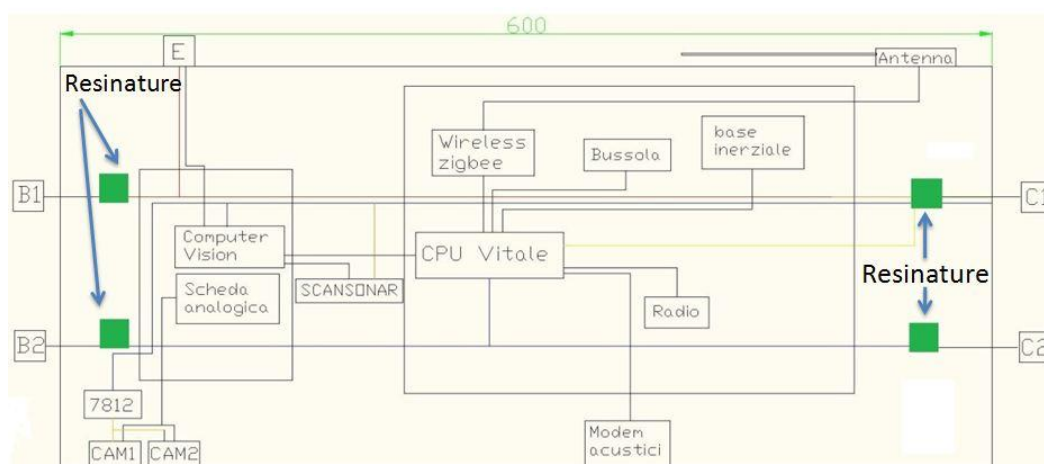
La sezione del pacco batterie di poppa (fig.27) contiene meno strumentazione possibile in quanto anch'essa contribuirebbe al fenomeno descritto precedentemente. Si è scelto di inserire i driver per il controllo dei motori che inseriscano un forte disturbo per tutta l'elettronica più vicino possibile ai motori in modo da limitare i disturbi. La comunicazione avverrà tramite CAN bus in quanto è stato appositamente ideato per applicazioni per veicoli e non risente dei disturbi prodotti dei driver.



**Figura 27 Sezione batterie di poppa**

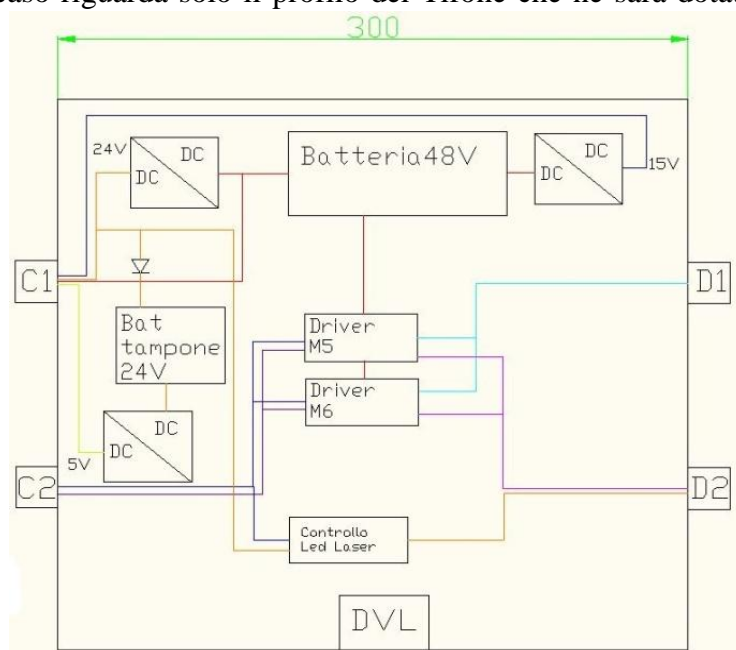
La sezione centrale (fig.28) è la più complessa e importante e racchiude la maggior parte della strumentazione. L'antenna si alzerà in assenza di pressione consentendo la comunicazione in superficie e riducendo gli attriti in immersione. E' facile pensare che per esplorazioni su fondale basso (10-20m) e per settaggi preliminari sia disponibile, tramite il connettore "E" che integra una ethernet e la carica per la

batteria, un controllo diretto del Tifone tramite un access-point posto su una boa in superficie o direttamente con cavo.



**Figura 28 Sezione centrale**

Il pacco batterie di prora (fig.29) contiene, oltre ai driver, anche le unità di conversione DC/DC che forniscono le alimentazioni a tutta la strumentazione, una batteria tampone per consentire al pc 104 di chiamare e dare la posizione per il recupero del mezzo nel caso in cui si scarichi la batteria centrale. Contiene inoltre un dispositivo programmabile, se non potrà essere usata una delle uscite digitali dell'azionamento Elmo, che accenderà i led e i laser quando sarà necessario. Il DVL è stato volutamente lasciato sconnesso in quanto la sua presenza in questa sezione, che in ogni caso riguarda solo il profilo del Tifone che ne sarà dotato, è ancora da valutare.



**Figura 29 Sezione pacco batterie di prora**

La sezione ogivale di prora (fig.30) contiene i motori thruster, le unità di illuminazione e la lama laser per la ricostruzione 3D. Il flesh allo xeno si accenderà di notte automaticamente e consentirà di avvistare il veicolo facilmente.

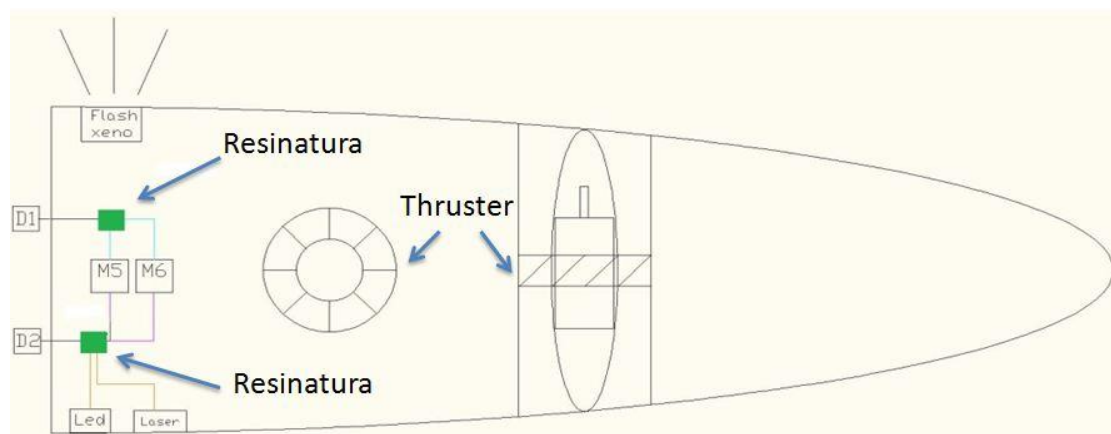


Figura 30 Sezione di prora

Importante valutazione è quella di considerare bene i connettori necessari. I connettori sottomarini resistono ad alte pressioni, ma costano delle cifre veramente proibitive.

Sarebbe consigliato eliminare le connessioni seriali per i driver e riuscire a connettersi tramite CAN bus per eliminare i vari pin evidenziati in rosso e risparmiare sui connettori o inserire il connettore per le seriali solo e soltanto per il prototipo consentendo una programmazione facile e un settaggio rapido quando necessario.

Un'altro modo per risparmiare sui connettori sarebbe quello di mettere i driver all'interno delle ogive evitando tutti i pin in viola e sostituendoli con solo 2pin per il can e 2 pin per le alimentazioni.

Anche in questo caso i connettori sono valutati senza considerare i vari profili dei veicoli e necessiteranno quindi di una valutazione migliore in seguito anche allo scopo di valutarne la sezione effettiva accoppiata ad uno studio sui possibili picchi di corrente ai quali devono resistere.

Di seguito la tabella 7 dei connettori.

Poppa/batt. poppa			Batt. poppa /centro			Centro/batt. prora			Batt. prora/prora		
N.	Pin	Ruolo	N.	Pin	Ruolo	N.	Pin	Ruolo	N.	Pin	Ruolo
A1	1	1:F1/M1	B1	1	1:+48V	C1	1	1:+48V	D1	1	1:F1/M5
	2	2:F2/M1		2	2:0V		2	2:0V		2	2:F2/M5
	3	3:F3/M1		3	3:48V CARICA		3	3:48V CARICA		3	3:F3/M5
	4	4:F1/M2		4	4:0V CARICA		4	4:0V CARICA		4	4:F1/M6
	5	5:F2/M2	B2	1	1:J1/20 GND CAN		5	5:24V		5	5:F2/M6
	6	6:F3/M2		2	2:J1/21 L CAN		6	6:0V		6	6:F3/M6
	7	7:F1/M3		3	3:J1/22 H CAN		7	7:15V	D2	1	1:M5/HALL A
	8	8:F2/M3		4	4:J1/2 Tx/M1		8	8:5V		2	2:M5/HALL B
	9	9:F3/M3		5	5:J1/1 Rx /M1	1	J1/20 GND CAN	3		3:M5/HALL C	
	10	10:F1/M4		6	6:J1/3 COM/M1	2	2:J1/21 L CAN	4		4:M5/GND 0V	
	11	11:F2/M4		7	7:J1/2 Tx/M2	3	3:J1/22 H CAN	5		5:M5/+5V	
	12	12:F3/M4		8	8:J1/1 Rx/M2	4	4:J1/2 Tx /M5	6		6:M6/HALL A	
A2	1	1:M1/HALL A	9	9:J1/3 COM/M2	C2	5	5:J1/1 Rx /M5	7	7:M6/HALL B		
	2	2:M1/HALL B	10	10:J1/2 Tx /M3		6	6:J1/3 COM /M5	8	8:M6/HALL C		
	3	3:M1/HALL C	11	11:J1/1 Rx /M3		7	7:J1/2 Tx /M6	9	9:M6/GND 0V		
	4	4:M1/GND	12	12:J1/3COM/M3		8	8:J1/1 Rx /M6	10	10:M6/+5V		
	5	5:M1/+5V	13	13:J1/2 Tx /M4		9	9:J1/3 COM /M6	11	11:LED+		
	6	6:M2/HALL A	14	14:J1/1 Rx /M4				12	12:LED-		
	7	7:M2/HALL B	15	15:J1/3 COM /M4							
	8	8:M2/HALL C	Interfaccia Esterno								
	9	9:M2/GND 0V	E	1		1:48V CARICA					
	10	10:M2/+5V		2	2:0V CARICA						
	11	11:M3/HALL A		3	3LAN						
	12	12:M3/HALL B		4	4LAN						
	13	13:M3/HALL C		5	5LAN						
	14	14:M3/GND		6	6LAN						
	15	15:M3/+5V		7	7LAN						
	16	16:M4/HALL A		8	8LAN						
	17	17:M4/HALL B		9	9LAN						
	18	18:M4/HALL C		10	10LAN						
19	19:M4/GND										
20	20:M4/+5V										

Tabella 7 Pinout connettori

## 2 - Le batterie

Sono l'elemento essenziale per ogni dispositivo elettronico, per la vita e per l'indipendenza da ogni fonte energetica. Sono stati fatti molti passi avanti dal 7 novembre 1801 quando Alessandro Volta illustrò la sua primitiva illuminare pila a Napoleone Bonaparte consentendo a tutta la comunità scientifica di avere a disposizione un accumulatore di carica in laboratorio[2]. Da quegli anni in poi si ebbe un forte incremento di studi a riguardo gettando inoltre le basi di quello che è l'attuale mondo elettrico ed elettronico che ha portato ad uno sviluppo esponenziale di tutti i settori lavorativi, commerciali e del benessere della persona in generale. La chimica da quegli anni in poi ha avuto molti cambiamenti quasi rivoluzionari di concetto e di modelli adottati per descrivere la realtà e non dimentichiamo che è grazie a quei modelli e studi della chimica che al giorno d'oggi è possibile vantare materiali raffinati e innovativi di leghe con caratteristiche totalmente diverse ed anche polimeri che non esistevano in natura.

Il principio di funzionamento degli accumulatori di carica è rimasto grossomodo lo stesso e rappresenta la sfida del XXI secolo. Una volta che sarà possibile immagazzinare molta energia, e con diversi cicli di carica, saranno disponibili veicoli elettrici per il trasporto non inquinanti. Anche se, del resto, dovrà essere non inquinante anche la centrale che produce l'energia con cui verranno ricaricati per ottenere veramente un prodotto non inquinante. [3]Si tratta di sfruttare il principio delle ossidoriduzioni. Mettendo due materiali, che possiedono un potenziale redox, opportunamente in contatto attraverso un conduttore (in alcuni casi un ponte salino) si ha un principio di ossidoriduzione. Le pile non ricaricabili ossidano e consumano i due materiali: per esempio la pila di volta, composta da strati di zinco e rame in serie, divisi tra loro da un dielettrico di stoffa o carta bagnata con acqua salata (quindi conduttore), ossida lo zinco.

Per le comuni pile non ricaricabili è questo il principio, ma il passo fondamentale si ebbe con l'introduzione di processi reversibili nel campo degli accumulatori di carica. Ossidoriduzioni sempre più complesse e perfezionate in forme dimensioni e materiali

accoppiate allo sviluppo della chimica e dei modelli da essa adottati rappresentano l'evoluzione delle batterie ricaricabili moderne e costantemente in evoluzione. Questo capitolo presenta lo studio e la ricerca delle batterie più adatte al progetto avvenuto sia dal punto di vista teorico e quindi con le varie tecnologie a confronto sia dal punto di vista reale con ingombri e soluzioni proposte dai fornitori di batterie.

## 2.1 - Tecnologie a confronto

Quando si parla di batterie si parla di autonomia e di conseguenza si parla del progresso tecnologico avvenuto negli ultimi tempi. Detto questo è possibile valutare la tabella sottostante cogliendo quelli che sono stati i progressi nel corso degli anni. Benché consapevoli che i dati in tabella non corrispondano mai alla realtà effettiva di qualunque batteria di ogni tecnologia, ma ad una media[4][5][6] è stata fatta una valutazione tra i modelli classici di batterie attualmente in commercio e di facile accesso tralasciando i modelli teorici[7]o che ad ogni modo non potevano essere reperibili. La tabella 8 sottostante classifica quindi i modelli di batterie attualmente in commercio effettuando una media sui modelli analizzati e li valuta in diverse caratteristiche. Nel dettaglio le caratteristiche sono;

- ❖ Tensione nominale: tensione a vuoto della cella nel normale stato di lavoro. Fondamentale per capire quante celle dovranno essere installate per raggiungere una determinata tensione.
- ❖ Energia specifica: parametro importante nel nostro caso che lega la durata della cella al peso.
- ❖ Densità di energia: parametro che lega la durata della cella al volume occupato.
- ❖ Potenza specifica: parametro che indica la potenza massima erogabile dalla cella.
- ❖ Auto scarica mensile: ogni batteria si degrada autonomamente di una certa percentuale anche se non è usata. Le batterie al litio si degradano precocemente con l'aumentare della temperatura.
- ❖ Carica: è valutata in KC dove K indica il rapporto tra la corrente di carica e la corrente della batteria scaricata in una ora.
- ❖ Cicli nominali: sono le ricariche considerate complete di una carica e una scarica possibili della cella.
- ❖ Vita: indica la vita della cella a meno dei cicli di carica.
- ❖ Effetto memoria: difetto delle batterie che porta dopo qualche ciclo di scarica non completa e carica non completa una riduzione della capacità globale della cella.

Tecnologia	Sigla	Tensione nominale [V]	Densità di energia [Wh/kg]	Energia specifica [Wh/L]	Densità di potenza [W/kg]	Autoscarica mensile a 21°C	Carica	Cicli nominali	Vita	Effetto memoria
<i>Litio Polimeri</i>	Li-Poly	3,7	>180	300	2000	4%	3C	>1000	<5anni	no
<i>Litio Ioni</i>	Li-ion	3,6	170	270	1800	5%	0,9C	1200	<5anni	no
<i>Litio Ferro Fosfato</i>	LiFePo4	3,3	110	220	3000	5%	1C	>3000	>10anni	no
<i>Piombo acido</i>	PIOMBO	2,4	40	75	180	5%	2C	800	>10anni	no
<i>Nichel Cadmio</i>	Ni-Cd	1,25	80	150	150	>20%	0,9C	2000	>15anni	si
<i>Nichel Metallo Hydride</i>	Ni-MH	1,25	120	140	1000	>30%	0,3C	1000	>15anni	si
<i>Nichel Zinco</i>	Ni-Zn	1,65	100	280	900	Nc	0,5C	1000	>10anni	si
<i>Ricaricabile alcalina manganese</i>	RAM	1,65	160	160	1000	<0,3%	0,05C	100	>10anni	si

Tabella 8 Tecnologie a confronto

La tabella 8 mette in evidenza la superiorità dei primi modelli tutti estremamente ottimi in varie caratteristiche, ma con lo svantaggio di deteriorarsi indipendentemente dai cicli di carica. Analizzando le tecnologie nel dettaglio:

- RAM: tecnologia antiquata, presenta effetto memoria e un tempo di ricarica estremamente lungo.
- Ni-Zn: tecnologia rara da trovare in oggetti elettronici e poco diffusa.
- Ni-MH: tecnologia non recente ma che presenta tempi di ricarica ampi.
- Ni-Cd: bassa densità di potenza, effetto memoria, tempi di ricarica buoni.
- Piombo-acido: bassissima densità di potenza, ottima per costi e non presenta effetto memoria.
- LiFePo4: tecnologia che ha tutti i presupposti per diventare la batteria del decennio ma troppo recente (1998) per essere al pari delle colleghe per quel che riguarda la densità di energia.
- Li-Ion: generalmente ottima, ma presenta l'inconveniente di aver bisogno di una carica e scarica controllate. Il dielettrico liquido può infiammarsi. Vengono usate con successo in cellulari, fotocamere, portatili.
- Li-Po: batterie che stanno attualmente emergendo rapidamente e che prenderanno il posto delle Li-Ion attuali.

Evidentemente queste ultime batterie hanno tutte le caratteristiche in regola per essere utilizzate in questo progetto e saranno descritte nel dettaglio nel paragrafo successivo. Inoltre si differenziano in tre principali modelli, uno di alta densità di

energia, uno ad alta potenza specifica e uno intermedio. I grafici sottostanti (fig.31) forniti dal produttore di batterie Kokam[8] forniscano un'indicazione più dettagliata.

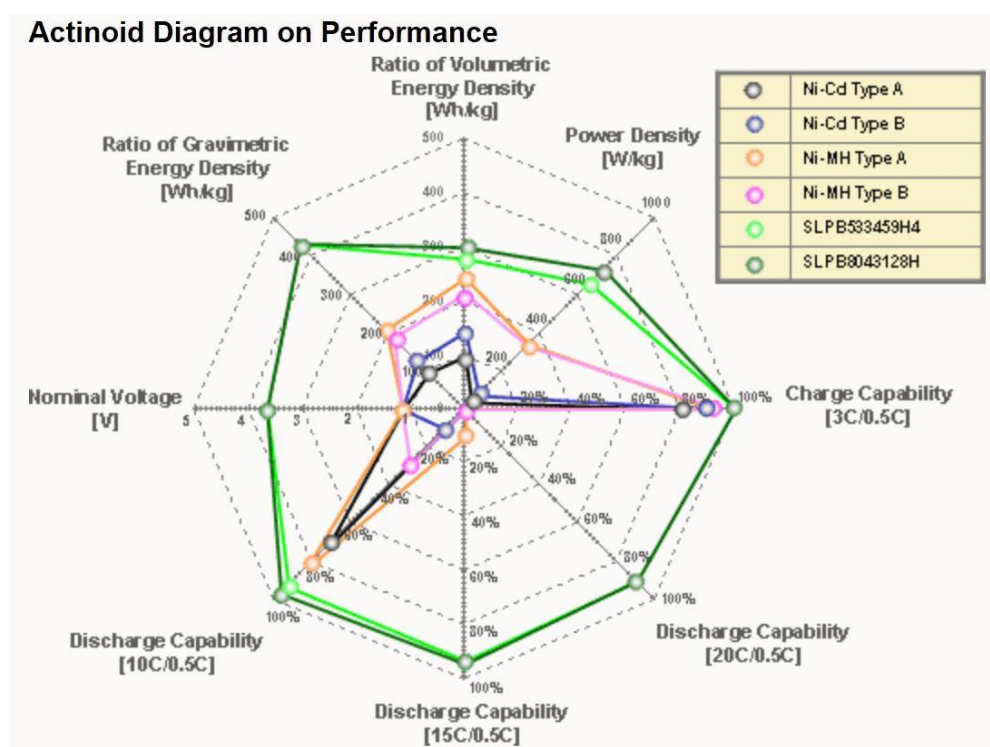


Figura 31 Caratteristiche delle tecnologie fornita da Kokam

Negli ultimi tempi si sono visti pubblicizzare sia in riviste scientifiche sia in programmi in televisione tecnologie che consentivano di ottenere supercondensatori. Le nanoporosità [9] con cui sono realizzati consentono di aumentare la superficie di contatto tra le piastre e di ottenere più di 50 farad in un tubetto del diametro di 40mm e lunghezza 100mm. Hanno una grande potenza specifica e possono scaricarsi o caricarsi in un tempo brevissimo, ma non hanno una elevata densità specifica di energia come queste batterie. I supercondensatori sono consigliati e possono essere impiegati in quelle applicazioni dove si scaricano e ricaricano frequentemente. Ad esempio, nei tratti cittadini, dove al semaforo occorre partire e successivamente frenare e quindi ricaricare il condensatore tramite lo stesso motore con quell'energia cinetica accumulata ed erogata in precedenza dal condensatore stesso tranne l'energia dispersa per attriti.



### 2.1.1 - Polimeri litio

La tecnologia Li-Po si è contraddistinta da un'analisi comparativa con le altre tecnologie. Questa tecnologia può essere considerata matura per il tempo di vita del brevetto che possiede (Anni '60), ma come ogni tecnologia pseudo-recente non è esente da perfezionamenti e crescite migliorative avute durante la produzione commerciale che è iniziata nel 1996[10]. Infatti da quegli anni ad oggi è migliorata tanto da superare, come caratteristiche, le celle litio ioni. La novità rispetto agli accumulatori litio ioni tradizionali sta nel separatore che non è più realizzato con un dielettrico liquido e infiammabile ma con un polimero plastico[11] ( Polyethylene Oxide o Polyacrylonitrile). Questa banale, ma tecnologica differenza consente l'adozione di misure di sicurezza più blande e quindi una confezione non più metallica e spessa che consentiva di rispettare le vigenti norme per dispositivi infiammabili e pericolosi, ma una confezione semplice che contiene le celle e che faccia un minimo di sottovuoto per mantenere il catodo e l'anodo vicini tra loro comprimendo il dielettrico polimerico che è un materiale in gel e a volte anche fibroso[12]. Tale polimero inoltre ha un peso specifico minore rispetto al liquido dielettrico tradizionale delle celle litio ioni riducendo ulteriormente il peso complessivo. Tali caratteristiche regalano alle celle li-po una densità di energia [Wh/kg] anche del 20% in più rispetto alle celle litio ioni e anche per questo vengono attualmente usate negli aeromodelli, ma stanno rapidamente prendendo campo in ogni applicazione. Per esempio Apple le monta già da tempo su iPhone ed anche un comunicato stampa rivela la notizia [13] che Sony abbia investito su tale tecnologia e le voglia adottare su portatili e su qualsiasi dispositivo prodotto del proprio marchio viste le 7,5 ore di autonomia dichiarate con la ultima propria serie "S" di notebook da 13,3" con core i7 e grafica integrata[14]. Inoltre i fogli laminati si adattano facilmente a tutte le dimensioni al contrario delle batterie tradizionali obbligatoriamente di forma cilindrica. Infatti non è necessario adottare una struttura a nido d'ape come le celle a ioni di litio tradizionali, ma basterà sovrapporre strati di spessore e dimensioni diverse per avere durata e scarica massima diverse alla stessa tensione di cella. L'inconveniente di queste celle è rappresentato dalla carica e scarica diversa per gli elementi posti in serie e parallelo probabilmente dovuto a tolleranze di produzione, temperature di esercizio diverse e ad una impedenza

caratteristica diversa, simile in ogni dielettrico, in funzione della frequenza di utilizzo[15] e accoppiata al comportamento passa-basso del collegamento tra di esse[16]. Quindi è consigliato il numero minore di elementi in serie e parallelo possibile con questi accumulatori a meno che non si inserisca un diodo per salvaguardare la serie da correnti parassite provocate da potenziali diversi dovute a loro volta ad una scarica diversa conseguente ad una diversa impedenza delle singole celle, data anche da tolleranze di produzione e vari valori di temperature di utilizzo fra le celle. Un perfezionamento a questo inconveniente è stato apportato tramite l'adozione di un integrato (chiamato BMS: Battery Management System), già adottato per le celle li-ion, che gestisce la ricarica e salvaguarda la cella dall'oltrepassare la tensione di Cut OFF ovvero 2,7V tensione limite inferiore alla quale la cella si danneggia. Di questi integrati ve ne sono di diversi tipi, ma tutti funzionano in modo simile: staccano la batteria dal circuito una volta che si è scaricata fino alla tensione impostata di Cut OFF e una volta in carica gestiscono un algoritmo e impostano le celle con le stesse tensioni fino alla massima tensione sopportabile ovvero 4,2 V. Un punto a favore è la scarica mensile che è inferiore al 3% a 15°C ma che sale al 4-5% a 21°C, del 15% a 40°C e 31% a 60°C simili alle colleghe agli ioni di litio[17]. Cosa da tener conto quando la batteria non viene usata per molto tempo e scollegata dalla carica, riducendo a poco a poco la tensione fino ad arrivare anche al di sotto della tensione inferiore di danneggiamento di 2,7V. In questo caso il processo non è reversibile e il bacco batterie sarebbe danneggiato irrimediabilmente. Con opportuni sistemi di raffreddamento possono essere caricate anche a 3C ovvero 3 volte la propria capacità nominale, quindi con sistemi opportuni che controllano la tensione e corrente tramite microprocessore che fornisce rampe di cariche ben controllate, anche in 20 minuti[18]. Inoltre presentano un processo di deterioramento indipendente dai cicli di carica, ma si compensa con il fatto di non avere effetto memoria e soprattutto con le caratteristiche che le rendono di qualità superiore per qualsiasi impiego.

## **2.2 - Le batterie in commercio**

Anche se la teoria spesso aiuta nelle scelte è sempre meglio verificare personalmente quello che il mercato offre. Anche perché è probabile che un fornitore o una azienda di produzione di celle di batterie abbia messo a punto una soluzione o una tecnologia che surclassasse le altre.

Per questo è stato fatto un foglio di calcolo che consente di vedere che modello di batterie ha la migliore densità di energia. Inizialmente si prevedeva di inserirle in dei cilindri, ma quando è stato possibile rendersi conto, dalla tabella, che occorrevano tra i 4 e i 12 cilindri solo per le batterie questa soluzione è stata abbandonata.

Sono state fatte 2 tabelle, una per le batterie cilindriche (tab.9) e una per le batterie prismatiche (tab.10) tutte che contengano dimensioni e caratteristiche delle batterie visionate in vari siti, inoltre non sono state inserite quelle batterie che a colpo d'occhio erano peggiori di altre già inserite. Il peso non è stato valutato in quanto doveva essere garantita una certa autonomia e certamente aumentare il volume globale per ottenerla non era un problema.

### **2.2.1 - Batterie cilindriche**

Considerando il volume globale delle singole celle è stata calcolata l'energia specifica, quante batterie occorrevano per formare 48V e 40Ah e il volume totale necessario sul volume del cilindro a disposizione.

Sono state fatte, infine, delle prove per verificare realmente quante batterie entrano nei cilindri dato che il volume occupato realmente non potrà essere corrispondente al volume calcolato totale della batteria in quando nell'accostare le batterie cilindriche e prismatiche si creano spazi vuoti.

Chiaramente queste prove sono state fatte solo sui modelli delle batterie che lo meritavano come detto in precedenza.

Nome	Sito	Tecnologia	Φ [mm]	h [mm]	R [mm]	Vn [V]	Ahn [Ah]	Wh/L	Volume tot./ Volume cilindo	N° serie	N° parallelo	n° Totle	N° Nei cilindri
Max	Cilindro da adottare		150	150	75	48	80	1449	1,0	1	1	1	
Nc	cina expo	LiPoFe4	33	61	16,5	3,2	3,5	215	6,7	15	23	343	
Nc	cina expo	LiPoFe5	27	140	13,5	3,2	4,4	176	8,2	15	18	273	
VI 2550 0-125	Saftbattery	Li-ion	24,3	49,2	12,2	3,6	2	316	4,6	13	40	533	
2 vl 34 570	Saftbattery	Li-ion	35,5	129	17,8	7,4	5,4	313	4,6	6	15	96	
vl 37 570	Saftbattery	Li-ion	37,4	59,5	18,7	3,7	7	396	3,7	13	11	148	12x2
vl 34 480	Saftbattery	Li-ion	33,9	50,8	17	3,7	4,4	355	4,1	13	18	236	
gp 700 dh	Saftbattery	ni-mh	33	60	16,5	1,2	7	164	8,9	40	11	457	
lcr 1865 0 2200	kaiobattery	Li-ion	18,5	65	9,25	3,7	2,2	466	3,1	13	36	472	48x2
lcr 1865 02 600	kaiobattery	Li-ion	18,5	65	9,25	3,6	2,6	536	2,7	13	31	410	48x2
lfr 32 650	kaiobattery	LiPoFe4	32,5	65,5	16,3	3,2	4,5	265	5,5	15	18	267	
ifr 42 120	kaiobattery	LiPoFe4	42,5	121	21,3	3,2	11	206	7,0	15	7	109	
vl 10v fe	Saftbattery	Li-ion	47	173	23,5	3,3	10	110	13,2	15	8	116	
vl 45e fe	Saftbattery	Li-ion	54	208	27	3,3	44	305	4,8	15	2	26	
vl 6a	Saftbattery	Li-ion	35	173	17,5	3,6	6	130	11,2	13	13	178	
vl 5u	Saftbattery	Li-ion	34	175	17	3,7	5	115	12,6	13	16	210	
vl 12v	Saftbattery	Li-ion	47	173	23,5	3,7	14	170	8,5	13	6	75	
vl 34p	Saftbattery	Li-ion	54	195	27	3,7	33	270	5,4	13	2	32	
vl41m	Saftbattery	Li-ion	54,3	222	27,2	3,6	41	287	5,0	13	2	26	
vl27m	Saftbattery	Li-ion	54,3	163	27,2	3,6	27	258	5,6	13	3	40	
ves100	Saftbattery	Li-ion	53	185	26,5	3,6	27	238	6,1	13	3	40	
Lic 18650 26	Varta	Li-ion	18,4	65	9,2	3,6	2,2	458	3,2	13	36	485	48x2
ifr38	Nc	LiPoFe4	38,5	133	19,3	3,2	10	207	7,0	15	8	120	

Tabella 9 Batterie cilindriche valutate

Le batterie di Kaiobattery hanno una densità energetica altissima. Purtroppo, chiesti i preventivi da parte dell'università per tali batterie, non sono risultate disponibili (probabilmente perché inesistenti). Come è possibile notare il numero di batterie effettive all'interno del cilindro si discosta di molto rispetto a quelle del volume occupato per intero. Per questo sono state prese in considerazione anche batterie di tipo prismatico, formato compatibile con la tecnologia Li-po.

### 2.2.2 - Batterie prismatiche

Questo formato di batterie è venuto fuori negli ultimi tempi, quando le tecnologie moderne degli accumulatori di carica consentivano una struttura laminata a fogli.

Ovviamente solo determinate tecnologie sono predisposte per essere impacchettate in prismi senza diminuire la loro densità di energia o potenza massima erogabile.

Nome	Sito	Tecnologia	L [mm]	H [mm]	P [mm]	Vn [V]	Ahn [A*h]	Wh/L	Volume tot./ Volume cilindro	N° serie	N° parallelo	n° Totale	N° Nei cilindri
Assente	kayobattery	Li-po	5,2	32	136	3,7	2,45	402	3,6	13	33	424	94
Assente	kayobattery	Li-po	7,2	46	127	3,7	5	442	3,3	13	16	208	44
Assente	kayobattery	Li-po	6,7	40	86,5	3,7	2,58	412	3,5	13	31	402	
Assente	kayobattery	Li-po	9,2	51	117	3,7	5,3	359	4,0	13	15	196	
Assente	kayobattery	Li-po	6,2	71	152	3,7	7,5	416	3,5	13	11	138	28
Assente	kayobattery	Li-po	17,5	26,5	48,5	9	0,55	220	6,6	5	145	776	
aa 86a	Saftbattery	Li-ion	145	62	55	11	5,3	121	12,0	4	15	64	
ba 684a	Saftbattery	Li-ion	67,4	37,1	89	7,5	6,8	229	6,3	6	12	75	
ba 685a	Saftbattery	Li-ion	259	79	73	15	13,4	135	10,8	3	6	19	
mp 144350	Saftbattery	Li-ion	43,9	54,5	14,9	3,8	2,6	273	5,3	13	31	394	
mp 174565	Saftbattery	Li-ion	45	70	19,7	3,8	4,8	290	5,0	13	17	213	
mp 176065	Saftbattery	Li-ion	60,5	20,3	70	3,8	6,8	297	4,9	13	12	151	
recing pak	Italymodel	Li-Po	137	20	46	7,4	4	235	6,2	6	20	130	
Enix	Rs	li-ion	70	60	20	3,8	6,8	304	4,8	13	12	151	
Varta	Rs	li-ion	70	38	19,5	3,7	4,4	314	4,6	13	18	236	
Varta	Rs	Li-po	64,7	36,8	11,6	3,7	2,26	303	4,8	13	35	459	33x2
V500ht	Varta	Ni-mh	6,5	24,2	34,1	1,2	0,51	114	12,7	40	157	6275	
LPP 454261 8TH	Varta	Li-po	4,6	61	42	3,7	1,59	499	2,9	13	50	653	76x2
Lip6476	varta	Li-po	10,5	48,7	33,9	3,7	2,03	433	3,3	13	39	511	
Pf7443150xp	hobbyking	Li-ion	175	48	39	19	4,35	246	5,9	3	18	48	
ENG-XE10	Nc	Li-po	225	99	6,4	3,7	10	260	5,6	13	8	104	
Kokam 40ah	Lipobattery	Li-po	217	220	9	3,7	40	344	4,2	13	2	26	
Kokam 16ah	KOKAM	Li-po	206	106	7,5	3,7	16	361	4,0	13	5	65	

**Tabella 10 Batterie Prismatiche valutate**

In realtà Kaiobattery offre le migliori prestazioni, ma come detto in precedenza è solo una strategia per avere rilevanza dai clienti e al momento di un ordine risponde che non ha in scorta il modello e ne consiglia un'altro praticamente uguale ma con densità di energia dimezzate. Un'altra marca, Varta, sembra essere ottima ma anche quest'ultima non risponde al contatto sul loro sito. I numeri in serie e parallelo crescano con il diminuire delle dimensioni e se fossero state scelte batterie di questo tipo, con tutte le saldature e collegamenti necessari sarebbe risultato un sistema estremamente poco affidabile.

### 2.2.3 - Batterie nei cilindri e soluzione adottata

Necessariamente occorre una valutazione più precisa per capire se la soluzione di inserire le batterie nei cilindri poteva essere adottata. Anche per capire l'ordine di grandezza del cilindro che doveva essere adottato. Le batterie valutate sono quelle riportate nella figura 32.

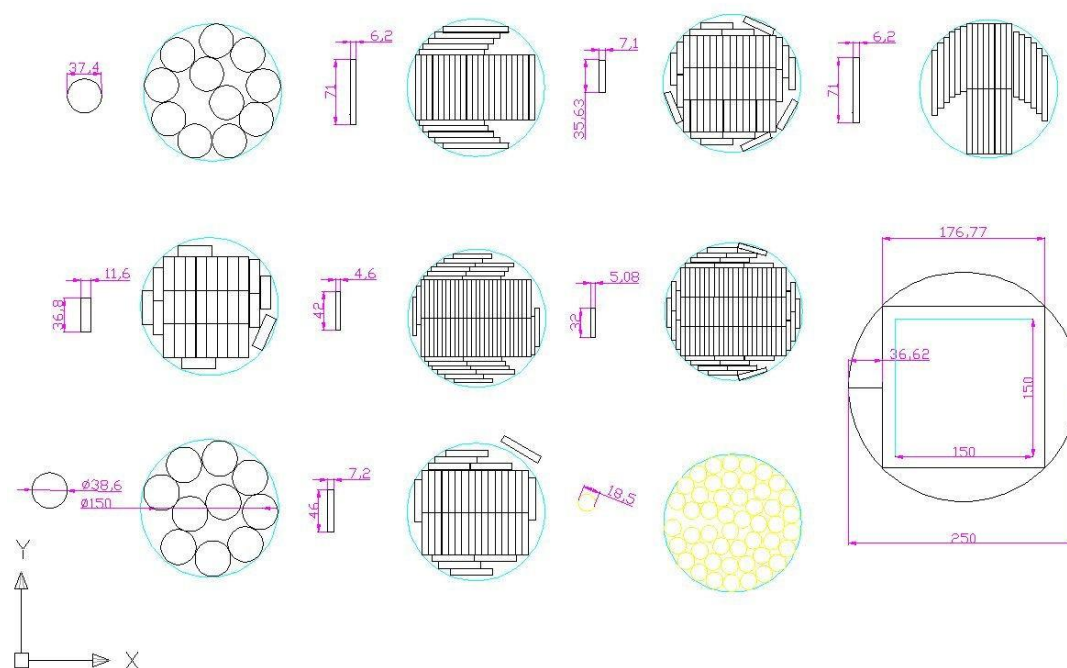


Figura 32 Valutazione ingombri batterie

Come è possibile notare le batterie cilindriche sfruttano poco spazio rispetto a quelle prismatiche e in più se hanno il diametro paragonabile a quello del cilindro che è 150mm moltissimo spazio tra le celle cilindriche non viene occupato. Infatti la migliore soluzione tra quelle cilindriche sembra essere quella in GIALLO che ha il diametro più piccolo di tutte. Nelle soluzioni prismatiche spiccano quelle più corte possibili ma il numero è veramente alto in tutte le configurazioni. In basso a destra vi è la sezione del veicolo con i cilindri. La ricerca delle batterie si è conclusa trovando un sito, [www.lipobattery.it](http://www.lipobattery.it), che utilizza i propri pacchi batterie per corse di kart elettrici e collabora con varie università sempre fornendo pacchi batterie e caricabatterie all'avanguardia. Il sito mostra come il pacco batterie Li-po montato su un kart elettrico da gara compete tranquillamente con kart di 125cc e mostra inoltre

la sua vittoria nella competizione, arrivando primo e partendo ultimo[17]. Le celle usate dalla ditta sono le Kokam da 40Ah, 2 pacchi da 48V, proprio la potenza che sarebbe stata necessaria al veicolo. Inoltre come detto in precedenza le celle, sia Li-Po che Li-Ion, sono sconsigliate per serie e paralleli di vari elementi e guardando le tabelle sopra è possibile vedere che sono presenti, in ogni caso, sempre un grandissimo numero di elementi. Questo ha consentito di scartare le celle piccole di dimensioni anche se erano quelle con una grande densità di energia, ma non solo. Infatti sarebbe stata necessaria l'installazione di un integrato di controllo per gestire la carica e scarica, per ogni o per gruppi, delle celle diminuendo lo spazio disponibile per loro stesse. Per giunta ottenendo con tutti i collegamenti elettrici necessari un sistema estremamente poco affidabile. La soluzione proposta da lipobattery ottiene quindi il consenso da parte di tutti gli esperti anche a favore di un pacco batterie preassemblato di 13 elementi con un unico piccolo integrato di gestione delle tensioni di carica e scarica e che sopporta l'utilizzo sfrenato e senza riguardi da parte dei piloti di kart che sicuramente non sono persone pratiche in materia. La soluzione adottata però è estremamente più ingombrante di quella originale ed è stato quindi pensato di alloggiarla in una sezione intera del sottomarino come mostra la figura 33.

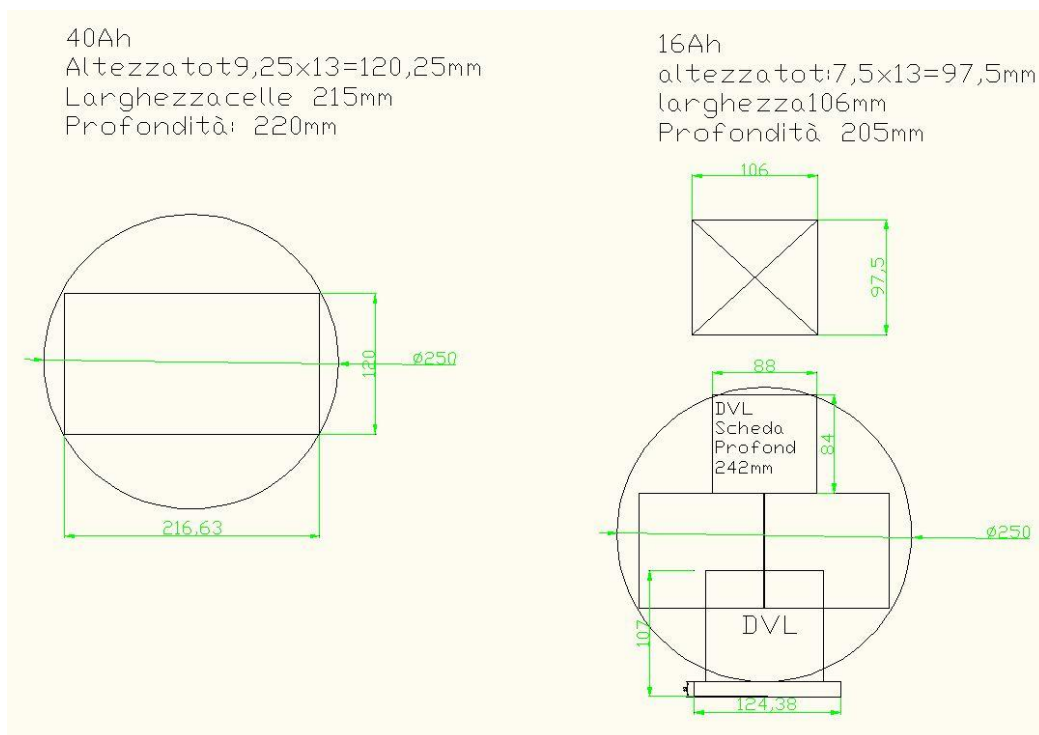


Figura 33 Batterie Kokam in sezione nel veicolo

In un veicolo è probabile che si inserisca un doppler velocity log nella sezione delle batterie e nel disegno sono stati valutati gli ingombri. Analizzando i grafici forniti da lipobattery[16] e presenti anche sul sito del produttore mondiale di celle litio polimeri Kokam (fig.34) è possibile analizzare la durata della cella in funzione della scarica. Come diverse tecnologie di batterie anche queste Li-Po tendono a durare più a lungo se scaricate al di sotto della loro corrente nominale. Queste curve caratteristiche rappresentate in figura 34 parametrizzano la scarica con un coefficiente secondo la legge KC con  $K=I_{\text{effettiva}}/I_{\text{nominale}}$ . Per esempio 1C=scarica alla corrente nominale, 2C scarica a 2 volte la corrente nominale, 0,5C= scarica alla metà della corrente nominale. Nel caso in esame e considerando il caso peggiore, ovvero il profilo di ricerca che consuma di più, si ha 480W di potenza utilizzati a 48V e quindi circa 10A su 80A a disposizione che corrispondono ad una scarica a 0,125C circa.

**40 Ah cell**    **1.0C = 40.0A**

❖ Charge : CC-CV, 0.5C, 4.2V, 2.0A Cut-off @ 23°C±3°C

❖ Discharge : CC, 0.5C~10.0C, 2.7V Cut-off @ 23°C±3°C

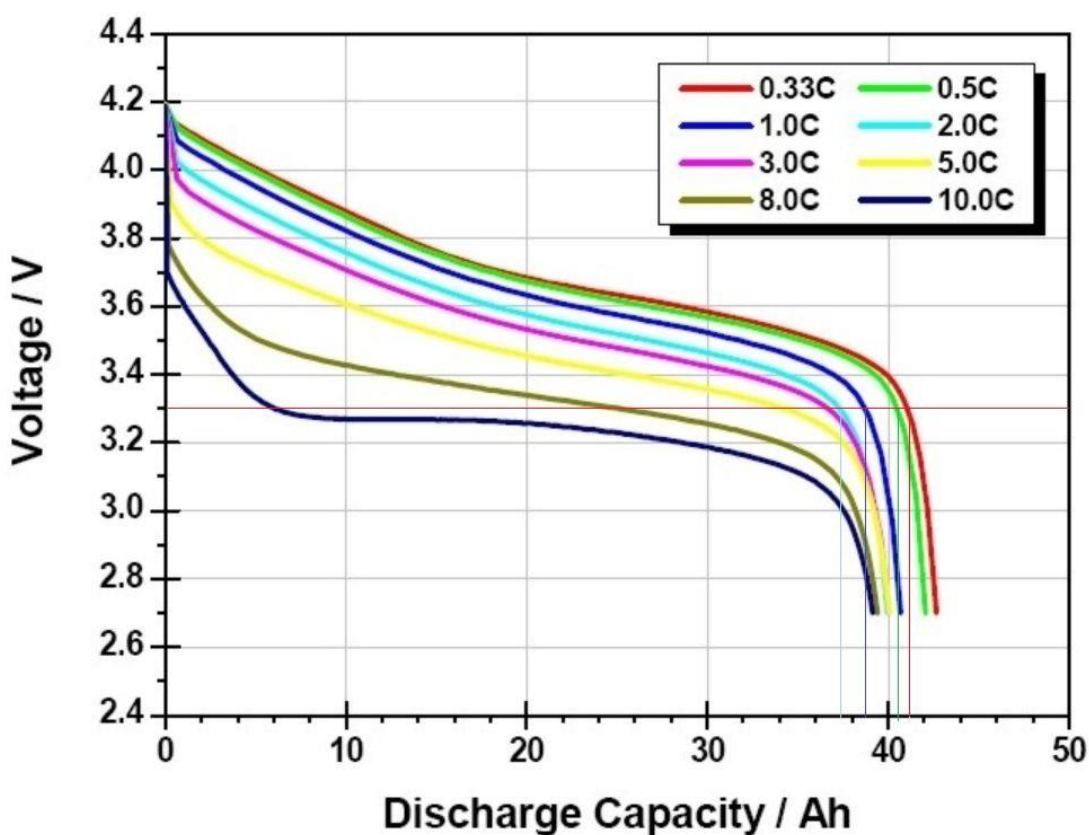


Figura 34 Durata in funzione della scarica delle celle adottate



Grazie a delle semplici comparazioni è possibile valutare le celle di almeno un 5% in più della loro capacità nominale. La linea orizzontale a 3,3V sta ad indicare la tensione alla quale l'integrato, fornito da lipobattery, interrompe la batteria dall'utilizzo. Un valore abbastanza alto ma che salvaguarda le celle da danneggiamenti e soprattutto aumenta la loro vita in cicli di carica, pur diminuendo solo di un 4-5% la capacità totale. Infatti in quella regione, e per scariche inferiori a 2C come nel nostro caso, la pendenza delle curve caratteristiche è notevole e si traduce in una riduzione minima della capacità globale pur aumentando i cicli totali di carica. I grafici prelevati dal sito del fornitore Kokam[18] chiariscono il concetto appena esposto di cicli di carica andando per altro a contrastare i valori della tabella di comparazione delle tecnologie e migliorando i pochi cicli di carica nei dati di targa forniti dalla tecnologia. Di seguito la tabella 35 con scarica a 1C e interruzione a 3V.

#### Characteristics of cycle life based on the 100% D.O.D

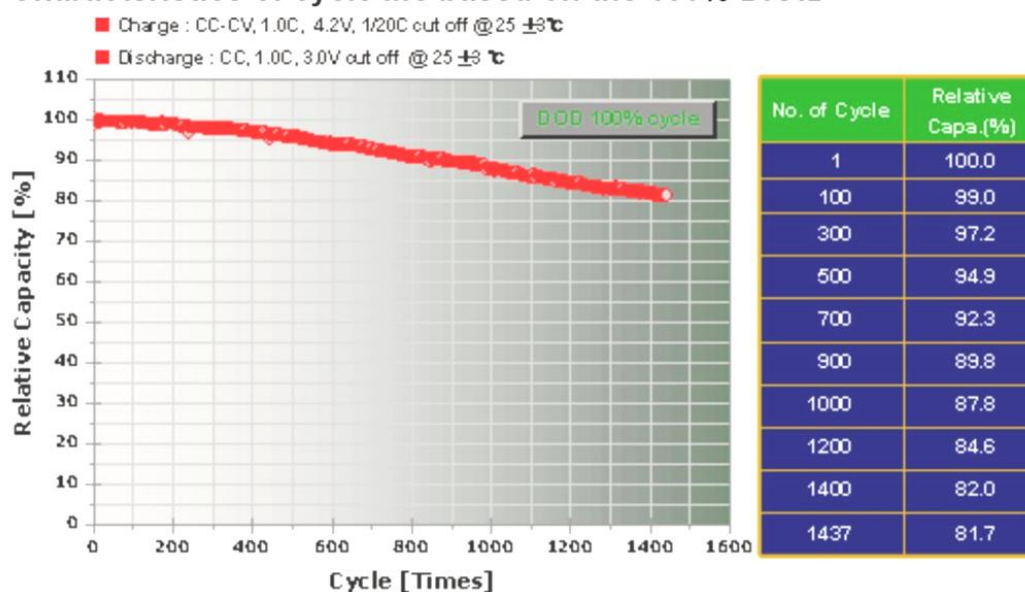


Figura 35 Cicli di vita con out OFF a 3V

La capacità di questa cella con tensione di scollegamento dal carico a 3V, che non sono 2,7V, passa a circa meno 20% dopo 1500 cicli di carica e scarica. Nel caso, invece, di tensione di out off 3,3V si ha un incremento dei cicli di carica notevole rispetto alla stessa riduzione di capacità. Inserendo anche un margine alto per la carica in modo da rimanere lontano dalla tensione di danneggiamento della cella si aumenta ancora la durata della capacità nominale nei cicli di carica. Nel grafico nella

figura 36 viene addirittura indicato che rimane il 100% di capacità di carica per i primi 1000 cicli, e una riduzione globale del 6% della capacità dopo 2500 cicli con tensione di carica di 4,14V e scollegamento dal carico a 3,35V. Escludendo i primi 1000 cicli e proseguendo con la stessa pendenza si avrebbe una riduzione della capacità del 6% dopo 1500 cicli e di conseguenza del 20% dopo circa 5000 cicli che sommati ai 1000 tolti in precedenza fanno 6000 cicli di carica e scarica per ogni pacco batteria con una capacità residua del 20%. Il D.O.D abbreviativo di depth of discharge e tradotto letteralmente "profondità di scarica" indica quanto si scarica la cella rispetto alla sua capacità nominale. Inserendo quindi valori di tensioni limite, sia inferiori sia superiori, tale valore non potrà essere del 100%.

### Characteristics of cycle life based on the 80% D.O.D

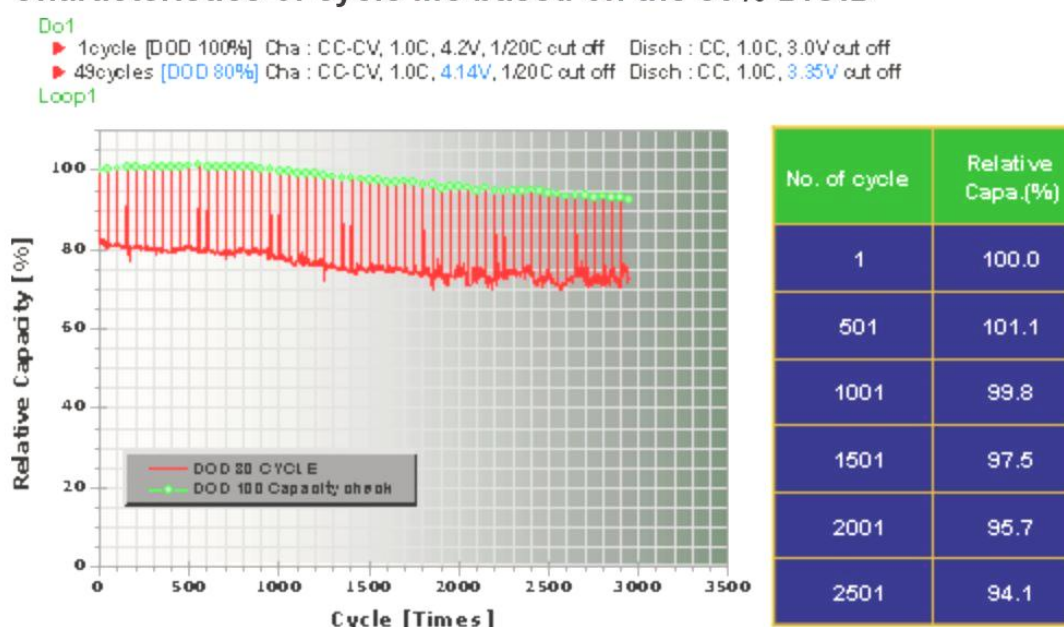


Figura 36 Cicli di vita con out OFF a 3,35V

Ovviamente queste sono prove fatte dal fornitore che forniscano dei risultati, e non è dato conoscere se sono state aggiustate per farlo essere più competitivo nel mercato.

## 2.3 - Revisione del progetto

La scelta di tali batterie ha portato una modifica del progetto iniziale che si presentava di diametro esterno massimo 250mm e con le batterie inserite nei vari

cilindri. Se tali cilindri fossero stati riempiti come in figura non sarebbe avanzato spazio per i cilindri della strumentazione, per la navigazione e la ricostruzione 3D. Questa soluzione ha segnato una svolta nel progetto in quanto ogni membro cercava di limitare al massimo l'utilizzo della strumentazione di propria competenza accontentandosi ogni qualvolta di meno potenza di calcolo, o meno potenza per la propulsione o illuminatori meno efficaci. Era stato pensato di limitarsi a dimensioni minori possibili per riuscire a trasportare il Tifone su un piccolo gommone senza grosse difficoltà, ma era già al limite delle dimensioni di praticità. La soluzione è venuta dal momento della divisione in sezioni con una sezione per le batterie sia a poppa che a prora esclusivamente per loro. Questa soluzione rende ancora più speciale e particolare l'utilizzo del sottomarino, infatti potrà essere trasportato in maniera agevole, smontato occupando in lunghezza meno spazio della prima versione e, grazie a delle calamite poste sui tappi delle batterie, è garantito un assemblaggio facile e veloce. Ma non solo, infatti nel caso in cui si voglia cambiare le batterie e riassegnargli un altro compito sarà possibile sostituendo l'intera sezione delle batterie di poppa e di prora. Infine per missioni di lunga durata sarà possibile aumentare le sezioni delle batterie in maniera simmetrica raddoppiando la durata della missione.

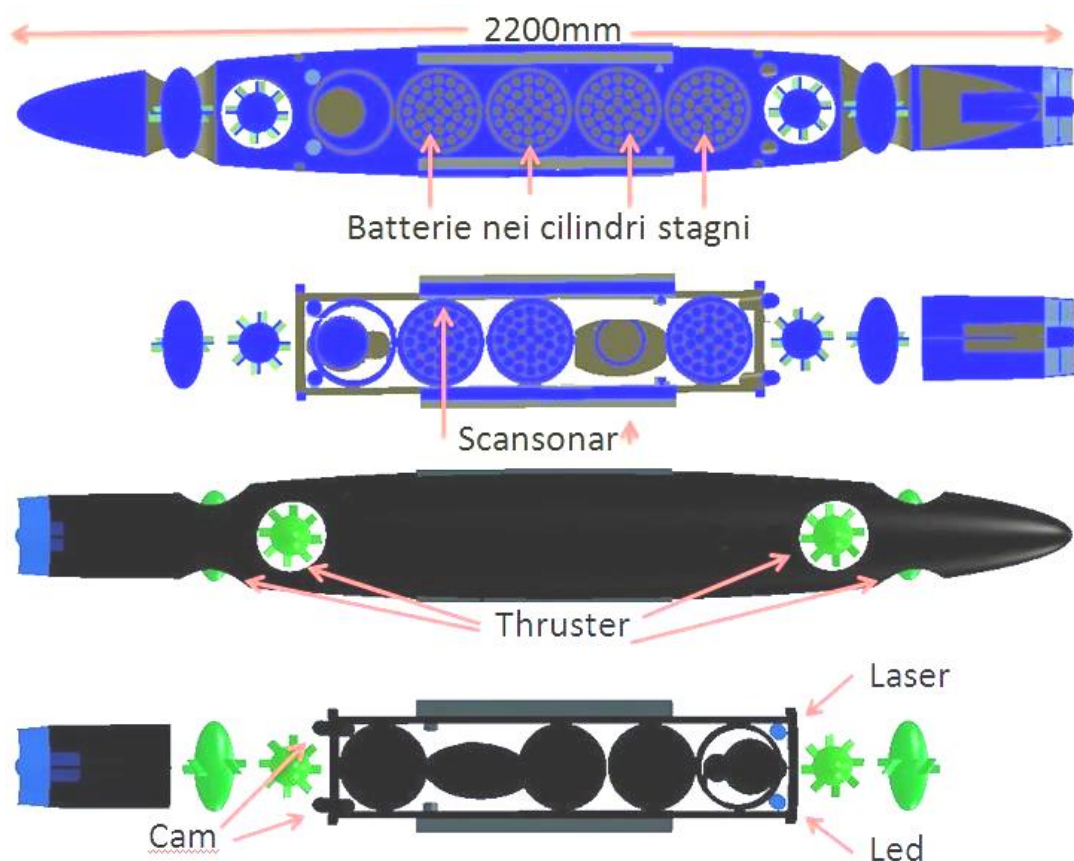


Figura 37 Progetto preliminare

### 3 - Azionamento Elmo Motion Control

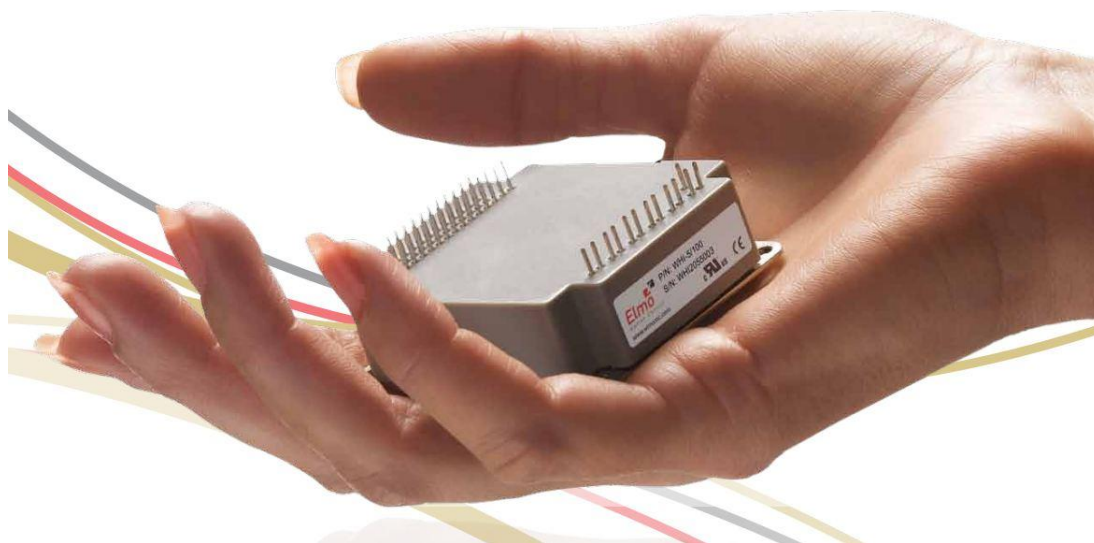


Figura 38 Elmo driver

Elmo Motion Control è un'azienda che produce e commercializza stadi di potenza e controllo per motori brushless per ogni settore estremamente tecnologico e competitivo e che richiede un oggetto di questo tipo. Dalla robotica alla produzione di semiconduttori, ai laboratori di automazione ai sistemi di puntamento militari, al settore navale e nautico, per arrivare al settore aerospaziale e medico questo driver, che chi è del mestiere sicuramente conosce, fornisce uno strumento di controllo ideale. La compagnia prevede di scaricare il software direttamente dal sito[19] e fornisce schede dettagliate e programmi semplici ed efficienti per la valutazione e prova dei prodotti. In questo capitolo è descritto il driver usato per il controllo della velocità e stadio di potenza sia per i motori di propulsione, sia per i motori di posizione thruster. Questo oggetto è quanto di più piccolo ed efficiente il mercato possa offrire e merita una descrizione approfondita. Successivamente alla descrizione è stato progettato e realizzato un banco prova per questo oggetto consentendo un'ampia esplorazione delle capacità che racchiude e uno studio futuro per applicazioni che necessiteranno di questo driver. La figura 38 fornisce una comparazione con le misure dell'azionamento.

### 3.1 - Il driver

Occorre precisare che in un veicolo sottomarino come il Tifone in questione è di essenziale importanza rimanere in volumi e pesi contenuti per ogni tipo di strumentazione scelta. Inoltre in un veicolo autonomo è di essenziale importanza avere un controllo delle forze generate più precise possibile rispetto a quelle desiderate. Dopo aver ottenuto una matrice delle forze da applicare al veicolo occorre trasformare le forze volute in comandi, nel nostro caso velocità angolari dei motori. Questi comandi di velocità angolari o coppie dei motori che possono arrivare anche in forma digitale o tramite una interfaccia di comunicazione Can bus devono essere trasformati, dallo stadio di potenza ovvero dal "Driver", in tensioni e correnti a frequenza variabile a seconda dalle velocità angolari e coppie desiderate. I driver di controllo in commercio presentano caratteristiche molto variegiate. Alcuni sono di potenza e non integrano un controllo, altri sono di controllo e non consentono di trasferire sul motore una buona potenza, altri ancora sono di grosse dimensioni e integrano entrambi. Il driver Elmo presenta caratteristiche notevoli di potenza e dispone di un controllo che si interfaccia con praticamente tutti i sistemi di retroazione. Per queste caratteristiche viene usato in moltissimi campi (fig39) [20].



Figura 39 Usi del driver Elmo [20]

I pesi e le dimensioni contenuti, uniti agli usi che già adottano questo driver con successo ne fanno il candidato ideale per l'utilizzo in veicoli AUV.

### 3.1.1 - Caratteristiche

Il driver adottato è caratterizzato da misure standard in  $38\text{cm}^3$  con  $L55 \times H15 \times P46,5\text{mm}$  per la maggior parte delle tipologie di potenze erogabili e 4 file di collegamenti elettrici stagnati che escono da una confezione plastica con la predisposizione metallica per un dissipatore esterno all'oggetto visibile in fig.40.

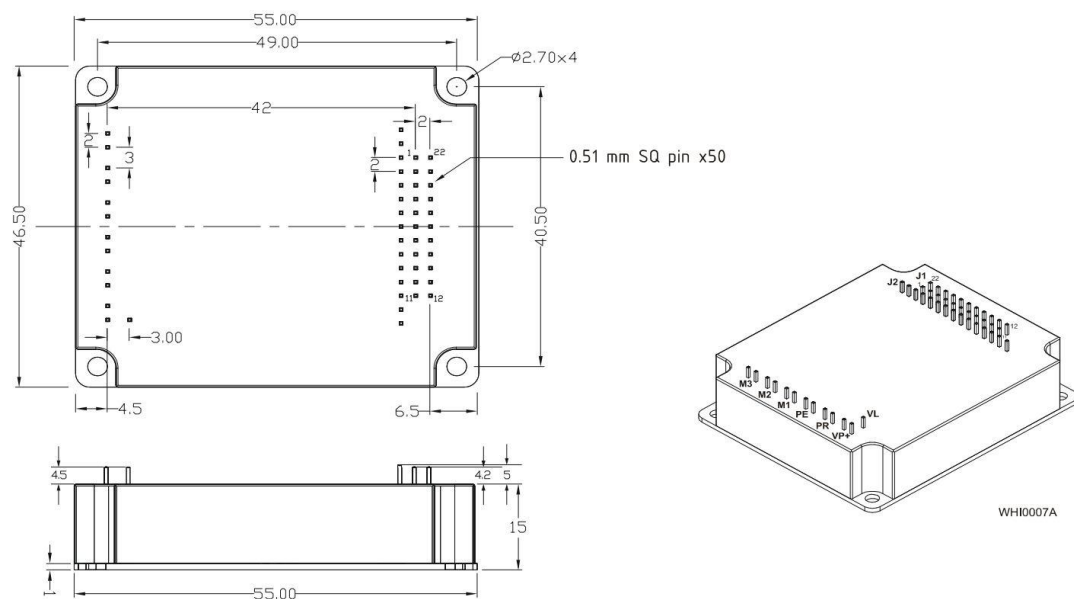


Figura 40 Dimensioni Elmo

Il pettine di collegamenti per la potenza è ben distante da tutti gli altri pin, sicuramente per evitare accoppiamenti elettrici che disturberebbero i vari segnali, e presenta 2 tipi di alimentazioni: una di potenza VP e una per la logica VL che possono essere anche accoppiate secondo le necessità rispettando i collegamenti elettrici sul datasheet, ma che comunque sono a potenziale negativo comune PR. Vi sono inoltre anche i collegamenti per le fasi dei motori chiamati M1, M2, M3 e PE acronimo di "protective earth" che consente una protezione nel caso di guasto. I pin per questi collegamenti elettrici sono doppi ammettendo una densità di corrente più alta. Le altre file di collegamenti elettrici sono chiamate J1 e J2. La prima, J1, per il collegamento delle interfacce sia analogiche che digitali e vi troviamo il collegamento per la porta seriale RS232, 2 uscite e 6 ingressi digitali, 2 canali bidirezionali e sulle ultime l'interfaccia CAN bus, tutti con i propri riferimenti di massa. Questo piccolo particolare consente di avere dispositivi diversi che dialogano

con il driver senza chiusure di massa particolari e riuscendo a semplificare in ogni modo i collegamenti elettrici tra i dispositivi. In tabella 11 è visibile il pin out adottato.

No. Pins	Type	Port	Function	Connector Location
2x11	2 mm pitch 0.51 mm sq	J1	I/O, COMM, Auxiliary Feedback	
15		J2	Main Feedback, Analog Input, LED	
2		M1	Motor power output 1	
2		M2	Motor power output 2	
2		M3	Motor power output 3	
2		PE	Protective earth	
2		PR	Power input return	
2		VP+	Positive power input	
1		VL	Auxiliary power input	

Tabella 11 Pinout Elmo

L'adattabilità di questo dispositivo ne fa uno strumento potente; infatti può comandare sia motori brushless sia motori in corrente continua e potrebbe fare da solo stadio di potenza per un controllore esterno utilizzando le connessioni con delle configurazioni esposte sul datasheet. Questo concetto di adattabilità è ancora più presente nelle connessioni J2, connessioni per la retroazione. Il Driver adotta le principali retroazioni usate nel campo della robotica senza aver la necessità di vari pin ma utilizzando gli stessi in modo diverso. Su questo pettine troviamo le alimentazioni per i sensori ad effetto HALL, un ingresso analogico, dei canali di ingressi che hanno il compito di adattarsi caso per caso alle retroazioni adottate, gli ingressi per i sensori HALL provenienti dal motore e i pin di indicazione led di segnalazione.

Le principali retroazioni, come indica la tabella 12, vengono effettuate o con il solo ausilio dei sensori HALL, o con sensori Hall e altri dispositivi. Lo schema delle connessioni consente una rapida visione delle retroazioni possibili con tanto di ruolo

per ogni pin. Per cablaggi e informazioni più dettagliate visionare il sito [www.elmomc.com](http://www.elmomc.com) e scaricare il datasheet.

Pin	Incremental Encoder		Interpolated Analog Encoder		Resolver		Tachometer and Potentiometer	
	Signal	Function	Signal	Function	Signal	Function	Signal	Function
J2/13	HC	Hall sensor C input	HC	Hall sensor C input	NC	-	HC	Hall sensor C input
J2/11	HA	Hall sensor A input	HA	Hall sensor A input	NC	-	HA	Hall sensor A input
J2/2	SUPRET	Supply return	SUPRET	Supply return	SUPRET	Supply return	SUPRET	Supply return
J2/1	+5V	Encoder/Hall +5V supply	+5V	Encoder/Hall +5V supply	+5V	Encoder/Hall +5V supply	+5V	Encoder/Hall +5V supply
J2/6	CHA-	Channel A complement	A-	Sine A complement	S3	Sine A complement	Tac 1-	Tacho Input 1 Neg. (20 V max)
J2/5	CHA	Channel A	A+	Sine A	S1	Sine A	Tac 1+	Tacho Input 1 Pos. (20 V max)
J2/10	INDEX-	Index complement	R-	Reference complement	R2	Vref complmnt f= 1/TS, 50mA Maximum	NC	-
J2/9	INDEX	Index	R+	Reference	R1	Vref f=1/TS, 50mA Max.	POT	Potentiometer Input (5 V Max)
J2/12	HB	Hall sensor B input	HB	Hall sensor B input	NC	-	HB	Hall sensor B input
J2/8	CHB-	Channel B complement	B-	Cosine B complement	S4	Cosine B complement	Tac 2-	Tacho Input 2 Neg. (50 V max)
J2/7	CHB	Channel B	B+	Cosine B	S2	Cosine B	Tac 2+	Tacho Input 2 Pos. (50 V max)
J2/3	ANALIN+ is used for Analog Input							
J2/4	ANALIN- is used for Analog Input							
J2/14	LED_2_OUT (AOKLED cathode) is used for LED indication							
J2/15	LED_1_OUT (AOKLED anode) is used for LED indication							

**Tabella 12 Tabella retroazioni**

Ovviamente come tante delle aziende che producano elettronica, anche Elmo non fornisce indicazioni sul tipo di integrati usati e neanche sulla disposizione dei componenti. L'unica cosa che è possibile vedere dal datasheet più intrinseca dell'oggetto è uno schema a blocchi (fig.41) che descrive l'architettura del sistema del driver. Sono evidenti i concetti di alimentazione chiariti in precedenza e separati tra principale e opzionale. Le interfacce di comunicazione con l'esterno RS232 e CAN, i veri tipi di retroazioni e I/O che fanno tutte capo ad un'unità centrale di controllo denominata appunto "Controller" che comanda uno stadio di potenza tramite il PWM



e che sembra inoltre fornire una protezione per il motore che è l'unico elemento esterno a tutto il Driver nella figura 42.

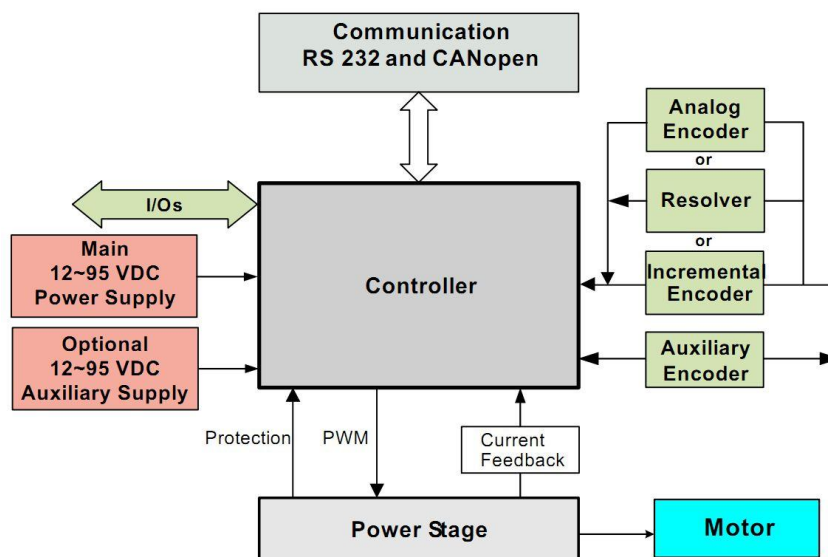


Figura 41 Schema a blocchi Elmo Driver

Una analisi che occorre fare riguarda la dispersione del calore generato da questo oggetto. Prendendo in esame il modello /60 che verrà installato nel veicolo sono state calcolate dal fornitore le curve caratteristiche per la dissipazione di potenza.

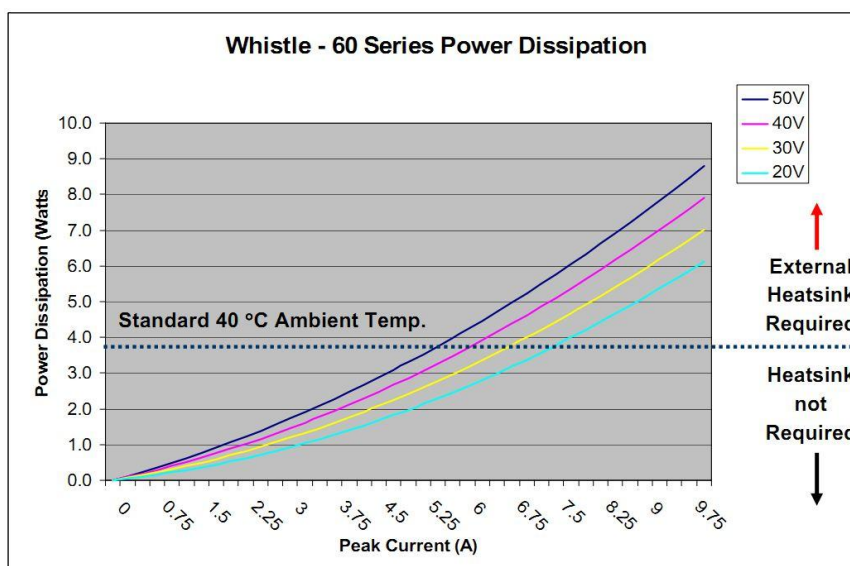


Figura 42 Curva di dissipazione del calore Elmo

Considerando una tensione di alimentazione di 50V e una corrente massima di 4,5A

è possibile valutare la dissipazione necessaria per ogni driver che si aggira intorno 3W. Per avere dati certi occorrerebbe fare una simulazione termica, ma dalle prove effettuate e descritte nel capitolo 4 è stato possibile verificare che l'oggetto non necessita di una grande dispersione (non si scalda affatto). Infatti il suo rendimento è maggiore del 99% come indica l'esauritiva tabella 13 sottostante che espone i vari modelli con tensioni nominali e potenze massime.

Feature	Units	15/48	20/48	1/60	2.5/60	5/60	10/60	15/60	20/60	1/100	2.5/100	5/100	10/100	15/100	20/100
Minimum supply voltage	VDC	6		7.5						12					
Nominal supply voltage	VDC	42		50						85					
Maximum supply voltage	VDC	48		59						95					
Maximum continuous power output	W	600	800	50	120	240	480	720	960	80	200	400	800	1200	1600
Efficiency at rated power (at nominal conditions)	%	> 99													
Maximum output voltage		> 95% of DC bus voltage at f=22 kHz													
Auxiliary power supply	VDC	11 – 95 VDC (up to 2.5 VA inc. 5 V/200 mA for encoder)													
Amplitude sinusoidal/DC continuous current	A	15	20	1	2.5	5	10	15	20	1	2.5	5	10	15	20
Sinusoidal continuous RMS current limit (Ic)	A	10.6	14.1	0.7	1.8	3.5	7	10.6	14.1	0.7	1.8	3.5	7	10.6	14.1
Peak current limit	A	2 x Ic													
Weight	g (oz)	50 g (1.8 ounces)													
Dimensions	mm (in)	55 x 15 x 46.5 (2" x 0.6" x 1.8")													
Digital in/Digital out/Analog in		6/2/1													
Mounting method		PCB mount													

**Tabella 13 Modelli e caratteristiche principali Elmo**

Dalla tabella è possibile notare la singolare dimensione e il ridotto peso per qualsiasi tipo di potenza continua erogabile dai vari modelli. Nel caso del veicolo sottomarino sarebbe consigliabile, in ogni caso, far combaciare la superficie scaldante del dispositivo con la scocca del veicolo in modo da farlo raffreddare con la temperatura dell'acqua esterna. Tutte le informazioni di questo paragrafo sono state prese dal datasheet scaricabile dal sito del produttore[19].

### 3.1.2 - Interfaccia software e utilizzo

L'interfaccia software di questo dispositivo merita una descrizione appropriata in quanto la semplicità e l'utilità di tale interfaccia si sono rivelate essenziali al fine delle prove effettuate del capitolo 4. Il dispositivo prevede la programmazione sicuramente tramite seriale, ma dovrà essere valutata in maniera più approfondita l'eventualità di una programmazione tramite CAN bus che farebbe risparmiare su connettori e quindi sui costi globali del progetto come già accennato nel capitolo 1. In effetti, appena aperto il programma Composer, scaricato dal sito del produttore, viene chiesto di stabilire il tipo di connessione se CAN o seriale RS232. Una volta effettuata la connessione, inserendo tutti i parametri del caso, è possibile avviare una procedura guidata che in pochissimi passaggi rende operativi al 100% e viene registrata in memoria così da non doverla fare dal principio ogni volta che venga effettuata una connessione. Nella procedura guidata verrà chiesto che tipo di motore il driver deve comandare, e selezionando Brushless sarà possibile accedere al valore di corrente di stallo e giri massimi e passare al passo successivo. Sarà quindi necessario inserire le coppie polari ed i parametri di picco delle correnti, le accelerazioni e decelerazioni massime per poi arrivare al settaggio degli ingressi e uscite digitali, che possono anche essere tutti inattivi. Uno step interessante è dato dall'acquisizione di alcuni parametri come l'impedenza e l'induttanza caratteristica del motore, che viene realizzata dal software sparando varie frequenze sugli avvolgimenti e misurando il voltaggio che ne deriva. Tutto abbastanza velocemente è realizzato dal software per acquisire i parametri di cui ha bisogno. Un'altro settaggio interessante è l'immissione dei parametri PID. In questo ultimo passaggio è chiesto di decidere il tipo di anello adottato dal controllo. Scegliendo la retroazione di velocità, come verrà adottato nelle prove, e inserendo dei valori per KP (il guadagno proporzionale) e KI (il guadagno integrale) abbastanza alti il motore inizierà a girare e a invertire il senso di rotazione per una trentina di secondi. Al termine stamperà un grafico con caratteristica velocità/tempo disegnando due curve: una curva desiderata e una curva effettuata. La differenza delle due curve è l'errore che si è creato. Le curve desiderate che il driver genera saranno in parte positive e in parte negative costringendo il motore a cambiare il senso di rotazione e poter valutare al meglio i parametri da inserire. Sarà quindi possibile effettuare nuovamente l'operazione con

parametri diversi fino a raggiungere la generazione del minor errore possibile. In figura 23 è possibile vedere un esempio di velocità effettiva e comando di velocità per il settaggio dell'azionamento.

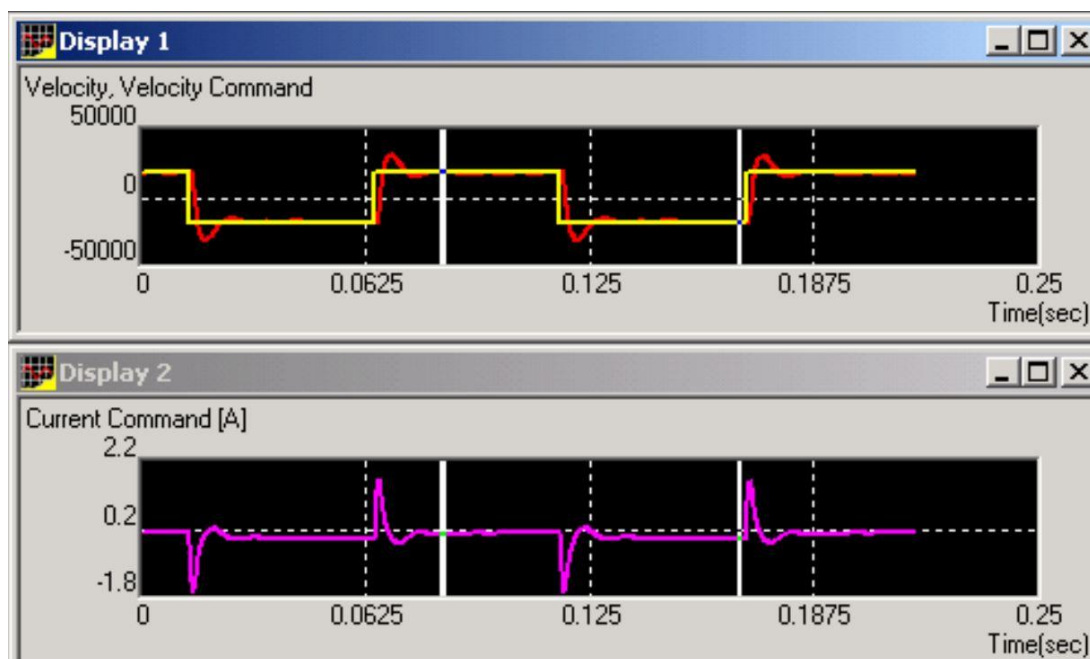


Figura 43 Esempio di generazione di curve di velocità per il settaggio Elmo

Il primo parametro da aggiustare è il  $K_P$ , che è un guadagno proporzionale all'errore[21], e sarà opportuno aumentare il suo valore se la curva di velocità reale non arriverà abbastanza in prossimità della curva desiderata, al contrario sarà necessario diminuirlo se la curva effettuata della velocità effettiva sorpassa la curva desiderata. Il guadagno integrale  $K_I$  è un parametro che corregge la distanza costante tra la curva di velocità effettiva e la curva di velocità reale. Infatti è un guadagno che si moltiplica all'integrale dell'errore generato e consente di correggere errori costanti[21]. Analogamente a quanto detto per il  $K_P$  è necessario correggere il valore del  $K_I$  per quanto possibile. Sarà difficile arrivare alla perfezione, ma con un po' di pazienza sono stati ottenuti risultati soddisfacenti.

Una volta terminata la procedura guidata è possibile accedere al pannello del profilo chiamato "smart terminal" (fig.44) nel quale è possibile modificare i parametri immessi precedentemente, o ad ogni modo aggiustarli, e dove è possibile impostare la velocità del motore, farlo partire e stopparlo. Sarà anche possibile cambiare il

senso di rotazione, impostare i filtri per il rumore, modificare i parametri KP e KI e accedere al pannello MotionMonitor (fig.45).

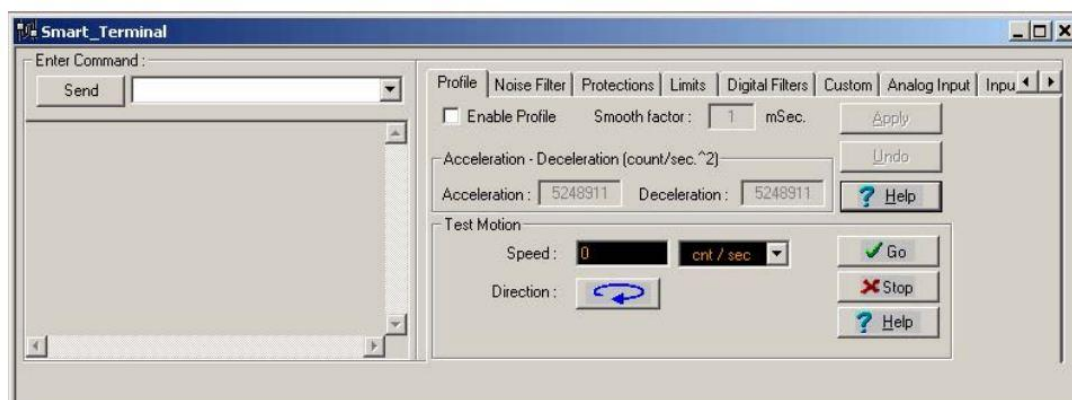


Figura 44 Smart terminal Elmo

Il pannello motion monitor è diviso in due settori: il recorder e l'indications. Il primo consente di visualizzare la velocità del motore o impostare a piacimento i 2 display con correnti assorbite posizioni del motore ecc.. e visualizzare lo stato di I/O. Il recorder fornisce un ottimo strumento di acquisizione. Tramite un evento di trigger impostabile a piacimento, sia in rampa positiva che negativa, è possibile registrare 8 parametri a piacimento e successivamente è possibile salvare i dati o in formato \*.txt o in formato \*.mat e di conseguenza fare studi approfonditi con matlab. Probabilmente la registrazione avviene su una unità di memoria fissa e aumentando la risoluzione il tempo di registrazione diminuisce. Per ottenere valori a lungo sarebbe indicato effettuare un'acquisizione direttamente su una uscita dell'Elmo.

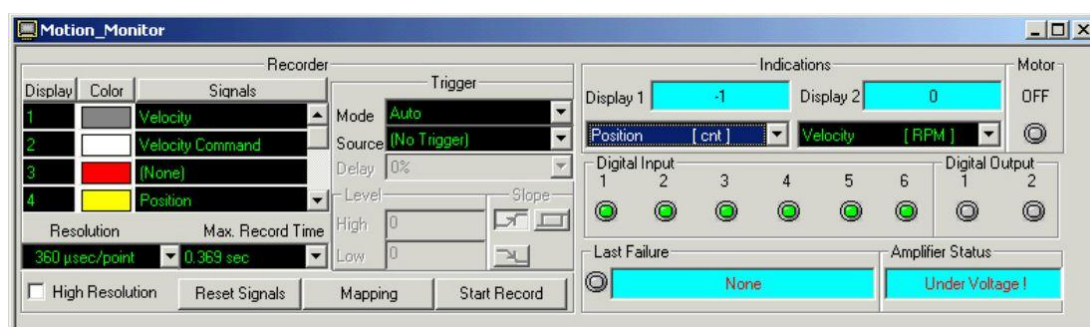


Figura 45 Motion Monitor Elmo

Questa intuitiva interfaccia ha permesso di effettuare le prove semplicemente.

## 3.2 - Il banco prova

La necessità di fare prove sui motori utilizzati, al fine di ottimizzare le eliche al massimo, ha incontrato la necessità di avere un banco prova per gli azionamenti elmo. Il banco prova Elmo, nel caso delle prove sulle eliche, doveva essere utilizzato vicino ad una vasca e per proteggere il Driver, che costa abbastanza, è stato pensato di realizzare un case che lo proteggesse almeno dagli schizzi, che durante le prove potevano colpirlo, salvaguardandolo dal guasto. Sarebbe stato solo un lavoro necessario alle prove per le eliche e quindi fine a se stesso, ma riflettendo è stato pensato di fare qualcosa di più interessante e che potesse essere d'aiuto in futuro. Infatti tenendo presente il concetto di modularità è stato pensato un banco prova per tutta la categoria di azionamenti Elmo, in quanto si prestavano avendo tutti le stesse dimensioni, e che potesse quindi accogliere azionamenti più performanti e scambiarli facilmente. Inoltre anche se per l'utilizzo attuale si limiterà solo ed esclusivamente una connessione seriale ed ai collegamenti per il motore, fasi e sensori Hall, sono stati connessi tutti i pin dell'azionamento consentendo in un futuro un'esplorazione ampia di tutte le caratteristiche dell'oggetto e una estrema adattabilità caso per caso. Infine sono state pensate connessioni rapide, e soprattutto estremamente facili da trovare e sostituire nel caso di danneggiamento. In questo capitolo sono stati descritti i passi per la progettazione del banco prova; è stato quindi introdotto un paragrafo per la normativa che interessa il banco prova, un paragrafo con le scelte per la disposizione dei componenti e infine la realizzazione stessa del banco prova.

### 3.2.1 - Normativa bassissima tensione

Il quadro gerarchico della normativa è complesso è molto articolato. Disciplina e normalizza prima a livello mondiale, europeo, nazionale qualsiasi tipo di azione volta ad essere effettuata ripetutamente e nel migliore dei modi. Tutto parte dal decreto legge 81/2008[22], art. 81 e più in generale il Capo III – “Impianti e apparecchiature elettriche” attualmente in atto, e che è una legge a tutti gli effetti che dice:

*"I componenti elettrici ed i relativi impianti di alimentazione devono essere progettati, costruiti e realizzati a regola d'arte:si considerano costruiti a regola*

*d'arte se sono realizzati secondo le norme di buona tecnica contenute nell'allegato IX, che riconducono alle specifiche tecniche emanate dai seguenti organismi nazionali e internazionali:*

- *UNI (Ente Nazionale di Unificazione)*
- *CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano)*
- *CEN (Comitato Europeo di normalizzazione)*
- *CENELEC (Comitato Europeo per la standardizzazione Elettrotecnica)*
- *IEC (Commissione Internazionale Elettrotecnica)*
- *ISO (Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione)."*

Detto questo per essere a norma di legge è doveroso seguire la normativa dettata dagli organi competenti elencati sopra. Una classificazione più dettagliata si ha prendendo in mano la normativa CEI[25] che normalizza i quadri elettrici e li caratterizza secondo l'ambiente operativo e le tensioni nominali di riferimento. Tali normative per impianti di bassa tensione sono:

- CEI 64-8 (per la sicurezza)
- CEI EN 60439-1 (di prossima abrogazione)
- CEI EN 61439 (di prossima pubblicazione: quadri di potenza, di cantiere e condotti sbarre)
- CEI EN 60204 (solo nel caso si tratti di quadri di automazione e/o a bordo macchina)
- Direttiva macchine e norme specifiche di prodotto (qualora il quadro sia a servizio di una macchina o di un impianto produttivo soggetto a normativa specifica)

Il quadro elettrico che è stato concepito per il banco prova Elmo fa parte della categoria "Zero"[23] ovvero sistemi elettrici con tensione nominale minore di 50V AC o minore di 120V DC. I quadri elettrici normalmente sono di categoria "uno" ovvero sistemi con tensione nominale maggiore di 50V e minore di 1000V AC e da 120 a 1500V DC. La categoria zero è descritta nella CEI 64-8 dagli articoli Art. 528.1.1 in poi e vengono classificati gli isolamenti elettrici da adottare che per un cablaggio strutturato che devono garantire l'isolamento per la massima tensione esistente all'interno dell'oggetto o canalina. Le tensioni, essendo bassissime e abbinate ad una impedenza del corpo standard, sono inferiori alla soglia di percezione di corrente di un soggetto e perciò garantiscono da sole la protezione contro contatti diretti e indiretti(411.1.1)[23]. In più gli unici oggetti che possono operare nelle vicinanze di specchi d'acqua sono proprio quelli di categoria zero.

Infatti la normativa che descrive gli impianti elettrici nei veicoli marini è descritta nella UNI EN ISO 10133:2002 dal titolo "Unità di piccole dimensioni - Sistemi elettrici - Impianti a bassissima tensione in corrente continua"[24] che specifica i requisiti per la progettazione, la costruzione e l'installazione di impianti elettrici a bassissima tensione in corrente continua funzionanti con tensione nominale di 50 V o minore su unità di piccole dimensioni con scafo di lunghezza fino a 24 m. Il quadro elettrico in questione cade inoltre nella categoria SELV acronimo di Safety Extra Low Voltage che sta ad indicare un dispositivo scollegato da terra e masse scollegate da altri circuiti pensando ad un uso futuro con il pacco batterie e in quanto l'alimentatore da laboratorio adottato fornisce un sistema isolato da terra ammettendo nessuna particolare protezione contro contatti diretti e indiretti(411.1.4.1)[23]. I dispositivi di cablaggio e connessioni sono stati scelti con criteri per impianti elettrici di tipo "uno" e quindi largamente abbondanti riguardo a tensioni di isolamento. Il case è stato scelto con lo standard IP55, standard da esterno, per garantire una certa resistenza agli schizzi accidentali.

### **3.2.2 - Layout banco prova**

La distribuzione dei componenti, durante la progettazione, è sicuramente una delle operazioni più importanti. Infatti si deve aver chiaro come si vuole usare l'oggetto per poter dare al cablaggio elettrico e alle connessioni il miglior accesso, tenendo a mente la normativa e le dimensioni degli oggetti, e di conseguenza avere un oggetto che risulterà facile da usare e connettere. A tale scopo è stata pensata una postazione per l'utilizzo che prevede a destra l'alimentatore, di fronte il pc, a sinistra il motore da controllare e dietro al pc il quadro elettrico. Un'altra valutazione è stata fatta per poter sostituire senza dover impazzire cercando le giuste connessioni il Driver Elmo con uno più performante. A tale scopo è stato pensato di inserire una morsettiera che dividesse il cablaggio dal lato del case a quello dal lato del driver mantenendo inoltre una numerazione crescente dal lato del driver che consentirà un cablaggio ordinato e rapido. Sono stati inoltre inseriti dei fusibili sia dal lato dell'alimentazione sia dal lato delle fasi dei motori, rispettivamente 2 fusibili per l'alimentazione di potenza e logica e tre per le fasi. Sono stati pensati solo per la protezione del quadro elettrico, in quanto il driver contiene già vari tipi di protezioni, e avendo utilizzato cavi di



1,5mm<sup>2</sup> è stato pensato di inserire fusibili da 10A come la normativa prevede. Nella figura 46 è visibile lo schema unifilare del banco prova.

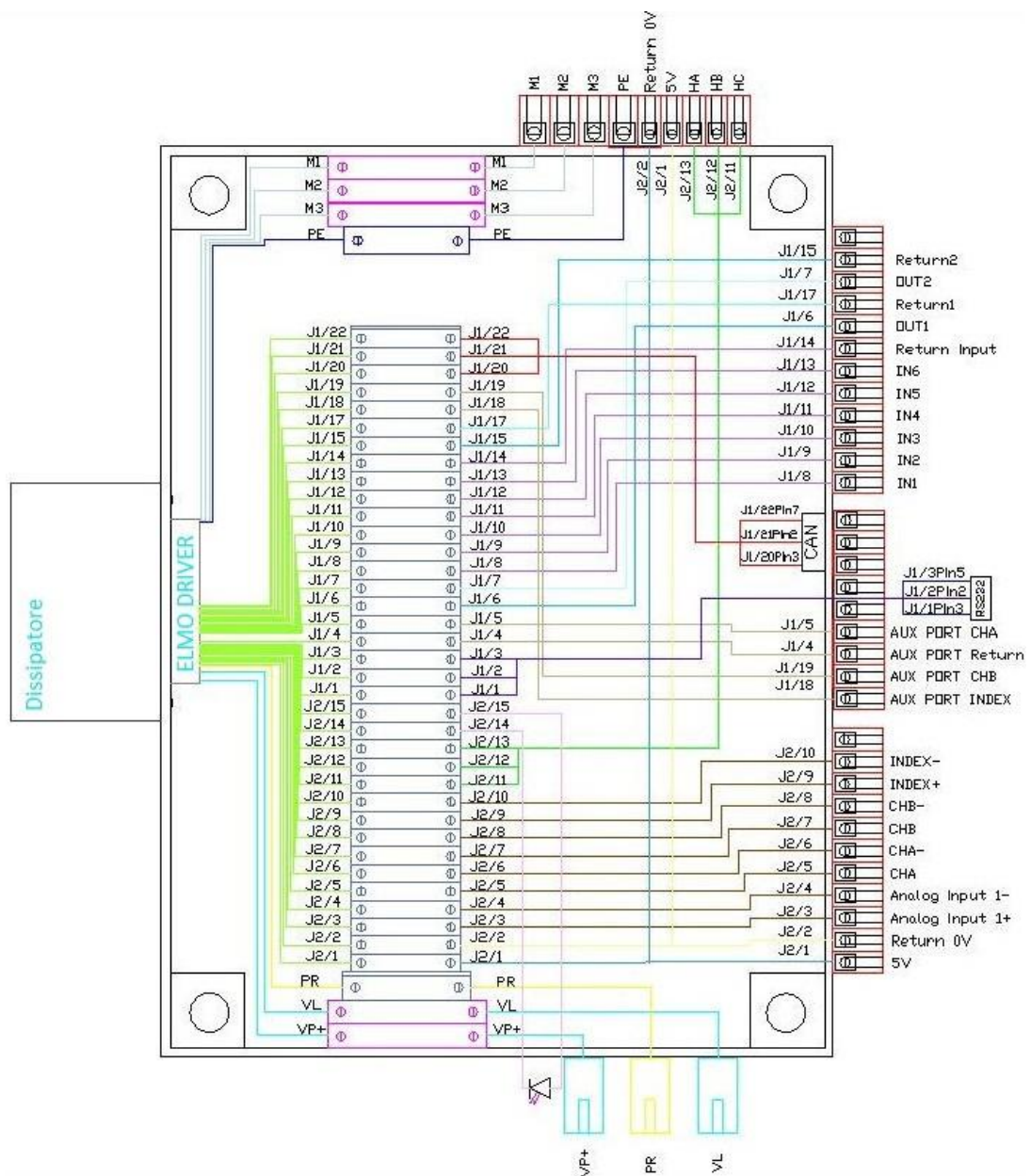


Figura 46 Schema unifilare

Le ridottissime dimensioni dell'azionamento hanno consentito una scelta della scatola dipendente esclusivamente dalle connessioni esterne, che sono state scelte in base all'utilizzo da laboratorio che ne deriva e un cablaggio completo dell'oggetto. Sono quindi stati inseriti dei connettori per le banane dell'alimentatore su un lato, in basso nella figura 46, e pensando ad un uso attacca/stacca veloce e con strumenti da

laboratorio è stato pensato al resto dei connettori con quelli che si chiamano Mammut e consentendo un rapido cablaggio, con un solo cacciavite, e senza connettori specifici e con la possibilità di sostituirli facilmente dato che si trovano comunemente in commercio. L'accortezza di tenere ben separati lo stadio di potenza dal resto del quadro non è casuale, infatti è stato pensato di avere minori disturbi possibili generati dagli accoppiamenti elettrici e dai picchi che il driver, durante il normale utilizzo, adotta per mantenere le variazioni di velocità volute. Così come la retroazione è stata cablata ancora più lontana dalla potenza assieme agli ingressi analogici. Sono quindi state raggruppate le alimentazioni(in basso), le retroazioni(in basso a destra), i bus ingresso-uscita (al centro a destra), gli ingressi e uscite digitali (in alto a destra) e i collegamenti per il motore da controllare (in alto). I colori del quadro elettrico sono indicativi e sono stati inseriti per la semplice differenziazione per ottenere un disegno il più chiaro possibile. Inoltre è stata cablata la seriale e il CAN bus che ci ha consentito di effettuare le prove tramite il software velocemente.

### **3.2.3 - Realizzazione**

*Il grande Michelangelo Buonarroti sosteneva che un quadro nasce dal cervello del pittore e non dalle sue mani.*

Non per essere paragonati a Michelangelo, ma per dire che dopo una progettazione "pensata" risulta abbastanza facile effettuare il cablaggio e dopotutto è atteso un buon risultato. Le connessioni di logica dal driver ai morsetti sono state effettuate con del cavo ethernet mentre dai morsetti ai mammut sono stati usati cavi di 1mm<sup>2</sup> di colore rosso in quanto essendo di logica, bassissima corrente e tensione, non necessitano di un colore specifico. Tutte le connessioni di potenza, fasi e alimentazioni sono state realizzate con cavi di 1,5 mm<sup>2</sup> nero, colore che può essere usato per indicare le fasi di un quadro elettrico. La connessione del terminale PE acronimo di protection earth è stata realizzata con una connessione giallo-verde anche quest'ultima assieme al suo morsetto giallo-verde come da normativa. Infine è stato tutto assemblato su una barra omega da quadro elettrico chiamata così proprio per la sua caratteristica forma.. Il banco prova visto dall'interno si presenta come nella figura 47.

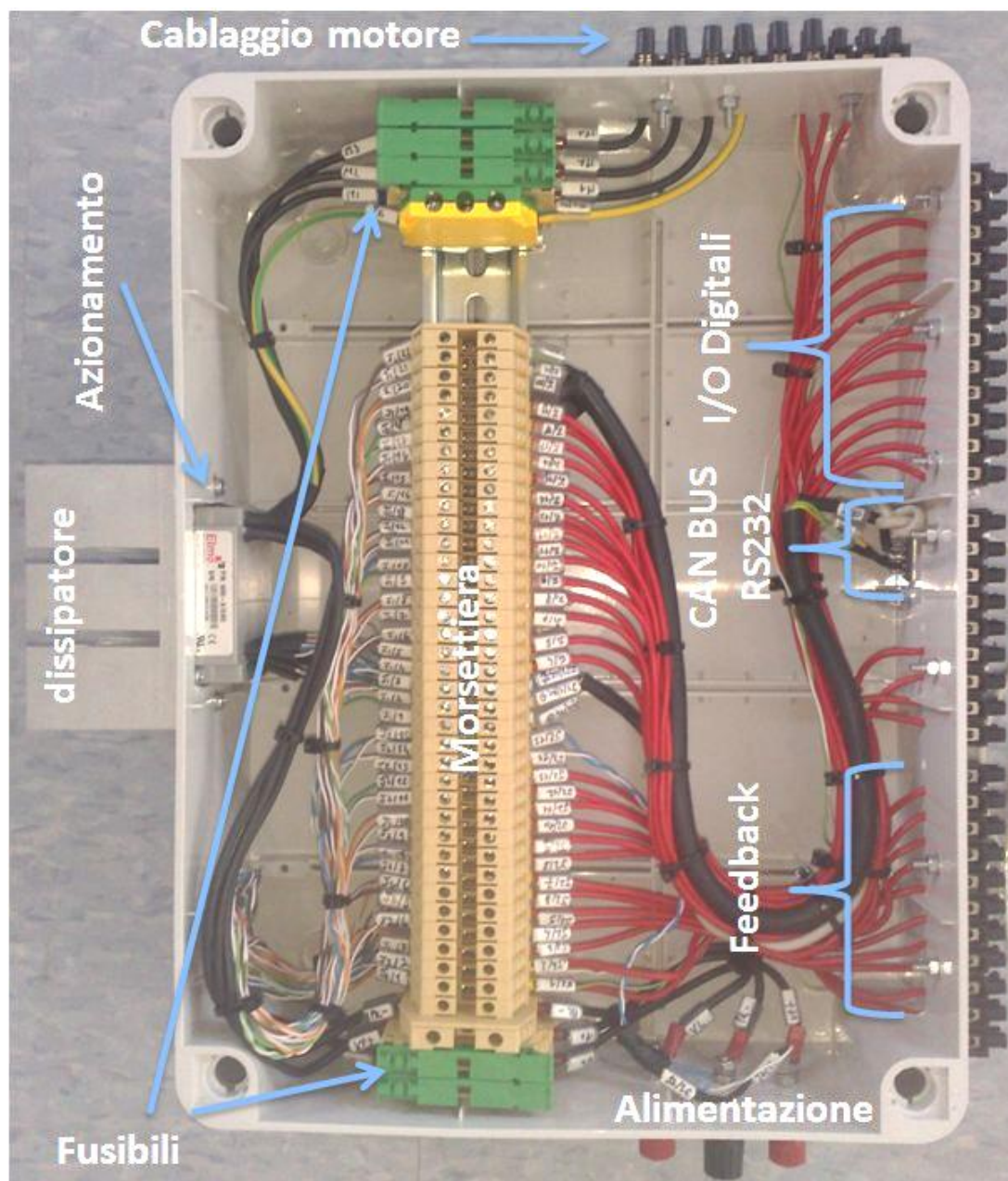


Figura 47 Vista superiore interna banco prova Elmo

Sono inoltre stati numerati tutti i cavi come nel progetto iniziale e come la regola d'arte indica e pensando di avere a disposizione il solo datasheet Elmo è stata pensata una numerazione identica a quella del driver in modo da poter abbinare il solo datasheet all'oggetto. Sono inoltre state fatte le etichette per il case che identificano i contatti sui mammut. Sono facili da trovare le similitudini con il quadro elettrico disegnato su Cad. Lo stesso banco prova visto in prospettiva chiuso e pronto per le prove si presenta come nella figura 48.



Figura 48 Vista esterno banco prova Elmo e motore a sinistra

Sono inoltre stati lasciati liberi alcuni mammut consentendo un ampliamento futuro, senza stravolgere l'intero layout, se fosse necessario.

## 4 - Test

La scelta di aver usato la compensazione a bagno di olio ha causato la variazione del rendimento del motore in quanto la viscosità dell'olio è diversa da quella dell'aria. Inoltre per valutare l'effettiva efficienza di spinta e la loro ottimizzazione per quanto riguarda il rapporto passo su diametro (pitch ratio) sono state necessarie delle prove effettive. È stata quindi pensata una struttura che consentisse di poter valutare il miglior passo su diametro e quindi le rispettive eliche. Inoltre lo studio delle eliche ha portato alla valutazione del diametro ottimale in funzione della spinta richiesta e coppia motrice a disposizione. Il capitolo quindi presenta lo studio della spinta ottenuta tramite una struttura di prova statica realizzata in parte con l'ausilio di stampante 3D.

### 4.1 - Postazione di test

Per poter realizzare una serie di prove e valutare la migliore elica e verificare la velocità del veicolo ammissibile dalla spinta effettiva è stata realizzata una struttura di prova appositamente pensata per l'occasione. Per poter misurare la spinta occorre un sistema che ricreasse condizioni simili al reale utilizzo. Non avendo a disposizione un prototipo per effettuare misure dinamiche durante il moto, in questa fase preliminare, è stata realizzata una struttura per delle prove statiche che fornissero dei valori di spinta. Si sono rese necessarie due tipi di strutture: una per i Thruster laterali e una per i propulsori descritti nei paragrafi successivi. La fotografia chiarisce la strumentazione necessaria ai test e come sono stati connessi tra loro.



Figura 49 Postazione di test

Vi è un alimentatore a due canali collegati in serie tra loro per fornire una tensione di 50V DC e un multimetro inserito in serie che misura la corrente erogata dall'alimentatore. In cascata è collegato il baco prova Elmo descritto nel capitolo 4 con tensione di logica e potenza allo stesso potenziale, quest'ultimo è controllato da un Pc tramite un convertitore RS232/USB e il suo programma di gestione. Per finire il banco prova è collegato al motore Faulhaber con i terminali M1, M2, M3 alle rispettive fasi ai rispettivi sensori hall.

#### 4.1.1 - Struttura della postazione di prova per i Thruster laterali

La struttura per i traster laterali (fig.50) prevede l'elica intubata, il motore a bagno d'olio, come sul veicolo e uno strumento per la misura della spinta. È stato dimensionato un cilindro stagno che contenesse il motore/riduttore dove, su uno dei due tappi, tramite una tenuta si trasferisse il moto all'esterno senza far fuoriuscire olio. I contatti per il motore sono stati resinati sul tappo tramite una speciale resina epossidica e stucco da carrozziere in modo tale da garantire l'ermeticità del cilindro e l'alimentazione al motore. Tramite un porta gomma sempre posizionato sul tappo del cilindro è stata realizzata una condotta per il riempimento dello stesso. Le due aste laterali, con funzione di guida e per contrastare la coppia di reazione del motore, permettono il movimento relativo, tramite 4 golfari, tra quest'ultime e il tubo in pvc contenente il cilindro stagno e l'apparato di propulsione. La bilancia di precisione misurerà la spinta come se dovesse misurare un peso variabile.

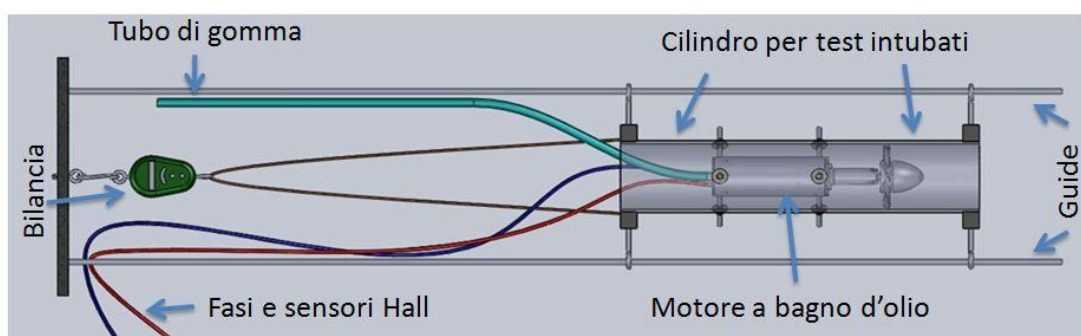


Figura 50 Assieme struttura prove Thruster

### 4.1.2 - Struttura della postazione di prova per la propulsione

La struttura per le prove di propulsione (fig.51) prevede la realizzazione dell'organo propulsivo avvolto da un mantello progettato appositamente e che possa raccogliere più acqua possibile, quindi posizionato lontano dal cilindro stesso. Per questa struttura è stata riutilizzata in parte la struttura precedente comprensiva di bilancia, guide, golfari e cilindro stagno. È ovviamente assente il cilindro in PVC che intubava le eliche per le prove Thruster. I vincoli per il mantello, oltre a centrarlo rispetto alla girante, sono stati realizzati con un profilo "alare" simmetrico o comunque molto fine per evitare che influissero sulle prove e quindi sulla spinta globale.

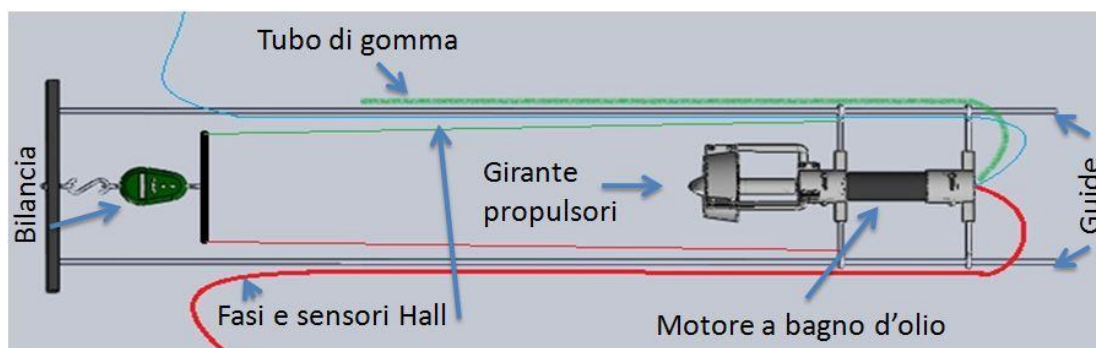


Figura 51 Assieme di struttura postazione di propulsione

### 4.1.3 - Motori ed eliche

Per la progettazione delle eliche sono stati utilizzati i dati di targa dei motori, al fine di elaborarli in modo tale da ottenere determinate grandezze caratterizzanti le giranti stesse. Quest'ultime, saranno utili alla determinazione del profilo della palettatura, realizzate mediante l'utilizzo di un apposito software, denominato Maritime Propeller Geometry. Grazie al software e conoscendo: numero di pale, geometria utilizzata, diametro, Pitch ratio ( $P/D$  passo su diametro) ed Area ratio ( $A_D/A_O$  area delle pale su area del cerchio che descrivono); è stato possibile ottenere una famiglia di punti relativi ad un sistema di riferimento nello spazio (XYZ) caratterizzanti un numero  $n$  di sezioni appartenenti ad una pala.

L'insieme di punti, opportunamente condizionato, è stato utilizzato per realizzare il modello solido della palettatura (fig.52) tramite il software di modellazione cad Solidworks. Nella figura 52 il profilo elicae la modellazione usati.

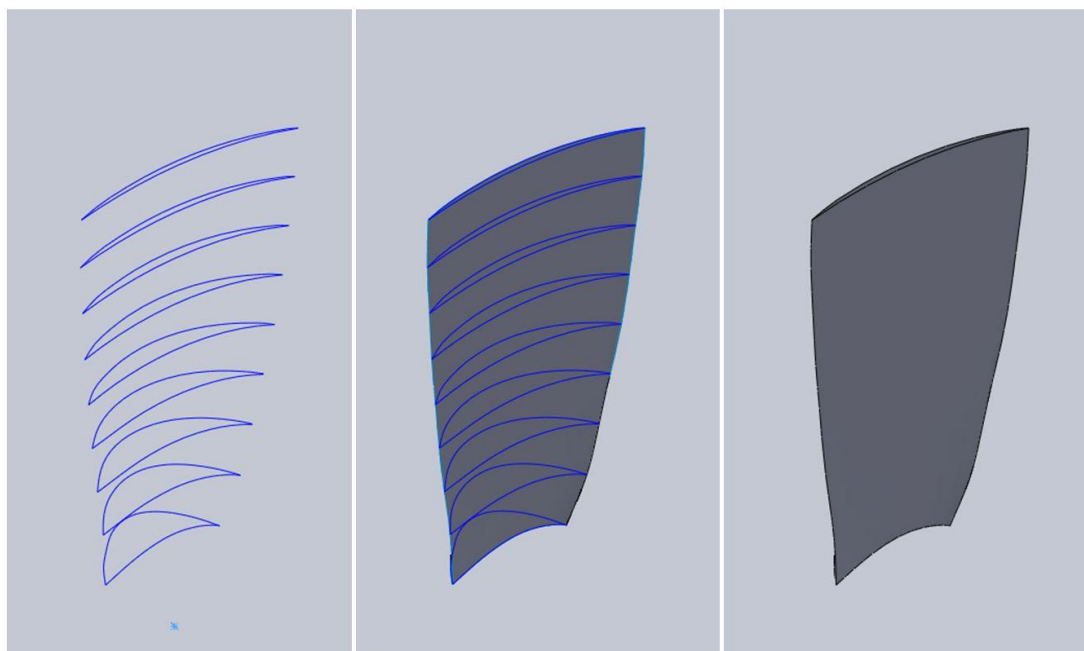


Figura 52 Modellazione profili elica

Le forze ed i momenti prodotti da una girante sono espressi in termini di una serie di coefficienti adimensionali [26], quali:

coefficiente di spinta

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}$$

$T$  - spinta prodotta dalla girante [N]

$\rho$  - densità fluido [kg/m<sup>3</sup>]

$n$  - numero di giri della girante [rps]

$D$  - diametro della girante [m]



coefficiente di coppia

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5}$$

$Q$  - coppia fornita dal motore [kg\*f\*m]

$\rho$  - densità fluido [kg/m<sup>3</sup>]

$n$  - numero di giri della girante [rps]

$D$  - diametro della girante [m]

coefficiente di avanzamento

$$J = \frac{V_a}{n \cdot D}$$

$V_a$  - velocità di avanzamento del veicolo [m/s]

$n$  - numero di giri della girante [rps]

$D$  - diametro della girante [m]

Il calcolo dei suddetti coefficienti, unitamente all'utilizzo di diagrammi sperimentali, ha permesso di ottenere un valore univoco di Pitch Ratio (P/D), rispetto al quale è stato possibile impostare la progettazione delle giranti. Per quanto concerne il valore di Area ratio è stato scelto in modo tale da non indurre il fluido ad avere separazione durante il moto.

Una prima analisi sugli apparati di propulsione ha portato alla scelta della geometria delle eliche di tipo Kaplan. Questa forma ha permesso: nel caso dei Thruster laterali, l'ottimizzazione di un profilo simmetrico in grado di generare spinte eguali in entrambi i sensi di rotazione, per i propulsori, l'applicazione di un mantello che permettesse una corretta protezione delle eliche in ambiente sottomarino, unitamente a un aumento di efficienza, dovuta alla particolare conformazione a profilo portante, del mantello stesso.

Volendo descrivere il processo di elaborazione dati, grazie al quale sono stati ottenuti i parametri principali per la realizzazione delle eliche, si focalizzerà l'attenzione su quelle di propulsione, anche se, risulterà analogo lo sviluppo dei Thruster laterali, con la sola variazione dei dati numerici. Dalla tabella 14 sottostante è possibile ottenere quelli che sono i parametri di partenza per il calcolo dei coefficienti adimensionali prima descritti, necessari alla determinazione del rapporto P/D.

CARATTERISTICHE MOTORI MAXON 400 watt				
COPPIA MAX CONTINUATIVA (da catalogo)	830	mNm	0.084608	Kgfm
COPPIA MAX CONTINUATIVA (maggiorata)	1079	mNm	0.10999	Kgfm
DENSITA' ACQUA ( $\rho$ )	1025	Kg/m <sup>3</sup>	104.4852	Kgf/m <sup>3</sup>
DIAMETRO ELICA (D)			0.12	m
VELOCITA' VEICOLO	5	kn	2.57222	m/s
NUMERO DI GIRI MOTORE	1800	RPM	30	RPS
THRUSTER	50	N	5.09684	Kgf

**Tabella 14** Caratteristiche motori eliche

Consideriamo una coppia massima continuativa maggiorata del 30%, prendendo atto che quella fornita da catalogo è relativa ad un utilizzo del motore in aria. Quest'ultimo, essendo immerso in olio e comunque lavorando in ambiente sottomarino, sarà sottoposto a un continuo raffreddamento, maggiore di quello ottenibile in aria, giustificando quindi l'utilizzo di tale valore di coppia.

Il diametro delle giranti è scelto valutando quelli che sono gli ingombri di progetto. Nel caso della propulsione è tenuto conto delle dimensioni della poppa del veicolo. Per i Thruster laterali è dettato dalle dimensioni dei tunnel entro i quali saranno alloggiati le giranti.

La velocità del veicolo è stabilita in modo tale da trovare una linea di incontro tra massima rapidità di movimento e durata delle batterie.

Il numero di giri elica risente delle limitazioni imposte sulla massima velocità periferica e della possibile comparsa del fenomeno della cavitazione sulla palettatura.

Da prove sperimentali è stato ricavato il valore della spinta necessaria per la movimentazione in acqua del veicolo, così da poter conoscere l'ultimo parametro utile alla determinazione del rapporto  $P/D$ . Il passo successivo è il calcolo del coefficiente di avanzamento e utilizzando il diagramma sperimentale mostrato in figura 53[26], relativo alle eliche in questione, ricavare, in funzione di quest'ultimo i valori dei coefficienti di spinta disponibili ai vari rapporti  $P/D$ .

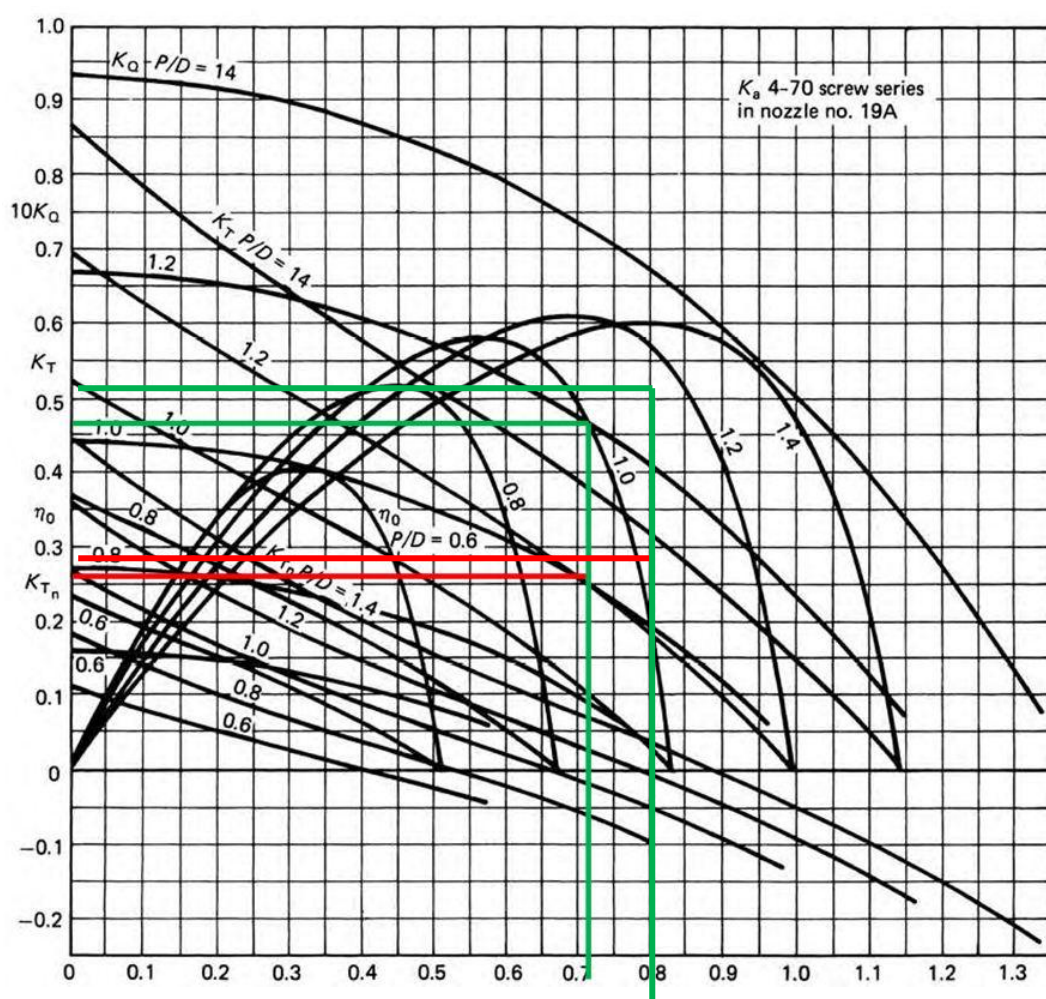


Figura 53 Diagramma sperimentale eliche Kaplan con mantello

Il  $K_T$  necessario (calcolato analiticamente) dovrà essere minore o uguale al  $K_T$  disponibile (identificato sul diagramma), quindi dovrà essere individuata la curva che rende vera tale disuguaglianza in modo tale da determinare univocamente il valore

del rapporto  $P/D$  corrispondente a tale curva. Per quanto riguarda il coefficiente di coppia, si ricava il  $K_Q$  richiesto in funzione del coefficiente di avanzamento e del rapporto passo/diametro ottenuto dallo studio della precedente disuguaglianza. Per il corretto funzionamento il coefficiente di coppia calcolato dovrà essere maggiore o uguale del coefficiente letto sul diagramma. In caso contrario il processo deve essere ripetuto variando il  $P/D$  scelto fino al raggiungimento della verifica delle disuguaglianze esposte. Individuato il corretto valore di pitch ratio in grado di soddisfare le esigenze progettuali si può procedere alla realizzazione grafica dei modelli delle giranti. Quest'ultime dovendo essere realizzate tramite prototipazione rapida (fig.54), la quale utilizza come materiale da costruzione una particolare tipologia di plastica "ABS", devono essere rinforzate in modo tale da poter resistere agli sforzi dovuti all'utilizzo. I dati ottenuti tramite Maritime Propeller Geometry devono essere proporzionalmente maggiorati in modo tale da ovviare a questo inconveniente, cercando di raggiungere il giusto compromesso tra resistenza meccanica e efficienza fluidodinamica. Per tenere conto degli eventuali errori di calcolo e delle imprecisioni dovute all'utilizzo dei diagrammi sperimentali, non sempre compatibili con le esigenze specifiche del progetto, si è reso necessario realizzare famiglie di eliche con  $P/D$  variabile nell'intorno del valore ottenuto per via analitica. Solo con la loro successiva realizzazione e tramite i valori ottenuti dai test di spinta, sarà possibile verificare la bontà dei dati ottenuti a livello progettuale.

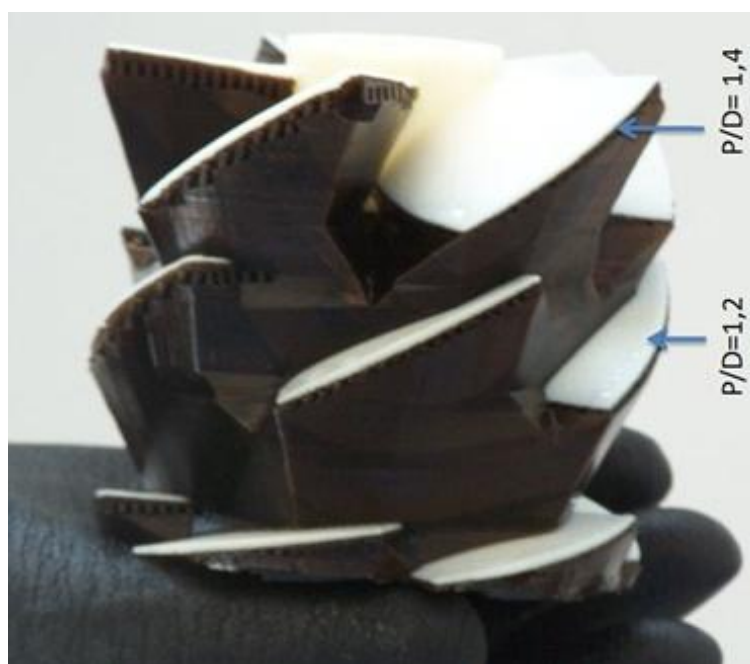


Figura 54 Prototipazione rapida, eliche a passi diversi su supporto

## 4.2 - Test effettuati

Le prove sono state eseguite in vasca cercando di immergere il più possibile la struttura di prova per ottenere dei risultati non influenzati dalle condizioni della vasca.

Tramite il programma di gestione dal Driver Elmo sono state stabilite delle velocità partendo da 100 a 1200 giri elica ovvero fin dove azionamento, alimentatore e motore potevano spingersi registrando i valori dati dalla bilancia.

Sul software sono state stabilite correnti nominali maggiorate rispetto a quelle consigliate sul datasheet in quanto il motore a bagno d'olio consentiva una dissipazione del calore maggiore.

I coefficienti KP e KI di retroazione in controllo di velocità dovevano essere modificati a intervalli di velocità in quanto il sistema presentava una coppia resistente fortemente non lineare. Infatti con coefficienti KP e KI bassi si raggiungevano agilmente velocità basse e l'inseguimento era garantito, ma cercando di raggiungere velocità alte il sistema non era pronto ed era necessario aggiustare i guadagni aumentando i coefficienti KP e KI. Viceversa per bassi valori di velocità e KP e KI alti si avevano moti vibratori e di oscillazione che facevano risultare il sistema estremamente instabile.

### 4.2.1 - Thruster laterali

Per quanto riguarda le prove sui Thruster laterali queste sono state articolate sia con il riduttore sia senza riduttore. Questo perché in un primo momento era stato pensato di poter fare a meno del riduttore in quanto dopo la prima accensione risultava estremamente rumoroso ed era stato pensato che potesse disturbare il funzionamento del modem acustico che lavora proprio a delle frequenze vicine a quelle percepibili dall'orecchio umano.

Successivamente, il rumore proveniente dal cilindro stagno, per effetto della continua lubrificazione dei cuscinetti in olio, era notevolmente diminuito, ed è stato ripensato

il suo utilizzo con il riduttore anche a fronte delle prove ottenute. La figura 55 chiarisce la struttura di prova utilizzata per i Thruster laterali.

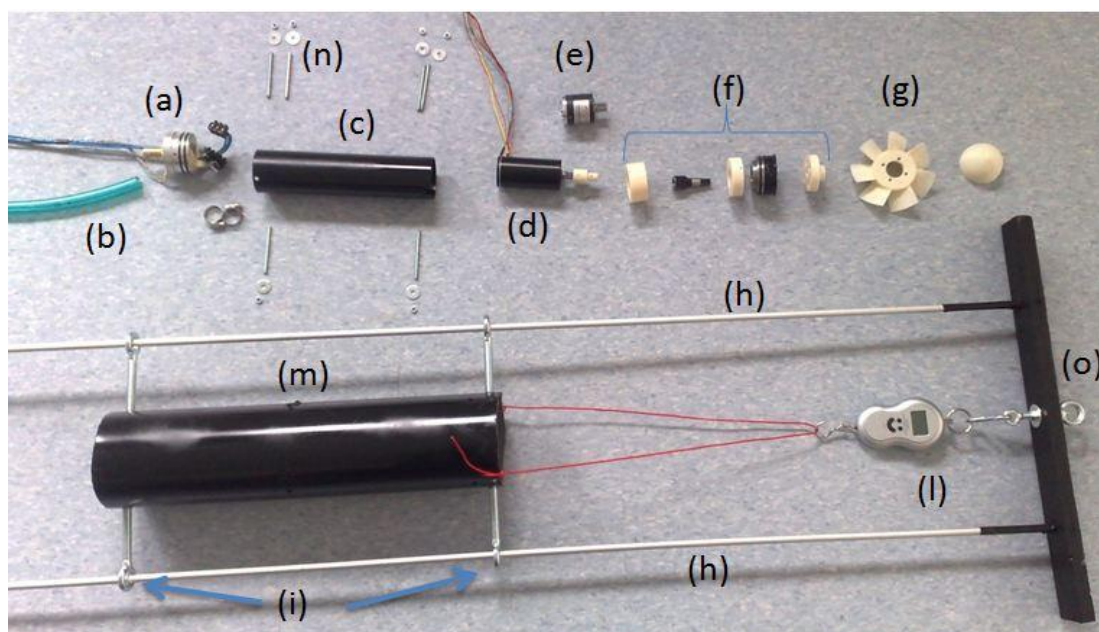


Figura 55 Esploso reale della struttura di prova Thruster

Partendo dall'alto a sinistra è presente il tappo (a) con le connessioni elettriche di alluminio e dove sporge il porta gomma di ottone. Poco più in basso la gomma (b) per il rabbocco dell'olio da innestare nel porta gomma. Proseguendo verso destra il cilindro stagno (c) che contiene il motore (d) e gli elementi necessari per tutte e due le configurazioni (f), con riduttore (e) e senza riduttore. Sul lato basso della fotografia è presente la struttura di prova (o) con il cilindro cavo (m) nel quale è stato ancorato il cilindro stagno (c) registrato (per evitare lo sfregamento delle eliche alle pareti) tramite le barre filettate (n). Tali cilindri sono vincolati a scorrere tramite occhielli (i) sulle guide (h) consentendo alla bilancia (l), legata alla struttura con il cavo rosso, di misurare la spinta delle eliche. La struttura per le prove dei Thruster montata si presenta in figura 56.

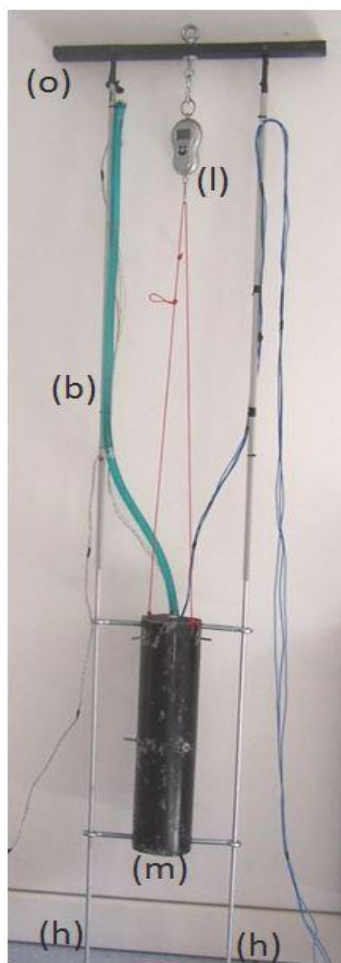


Figura 56 Struttura prove Thruster

### 4.2.1.1 Prove senza riduttore

Le prove effettuate senza riduttore hanno rivelato l'estremo bisogno di precisione degli elementi della trasmissione. Infatti per consentire al motore di far girare le eliche senza riduttore è stata fatta, con la stampante 3d, una prolunga che si vincolasse al pignone del motore. L'elasticità di tale prolunga permetteva alle eliche provate un moto di precessione che risulta vibratorio per alti numeri di giri. Le tenute, cercando di seguire il moto dello spinotto, creano una coppia di attrito che quindi va a diminuire la già piccola coppia fornita dal motore senza riduttore. Sono state effettuate prove, crescendo il numero di giri al minuto, fino a che l'alimentatore lo sosteneva probabilmente a causa di fenomeni ondulatori di ritorno su di esso. Le prove marcia avanti sono state eseguite con le eliche a circa 15cm dal bordo del condotto per intubarle, da lì aspiravano acqua mandandola verso il cilindro stagno. Come è possibile vedere dalla tabella 15 sono state fatte le prove su 3 eliche diverse.

MARCIA AVANTI												
	THRUSTER ELICA P/D = 0,6				THRUSTER ELICA P/D = 1				THRUSTER ELICA P/D = 1,4			
Tensione [V]	Corrente assorbita [A]	Giri elica [RPM]	Spinta [kgf]	Potenza assorbita [W]	corrente assorbita [A]	Giri elica [RPM]	Spinta [kgf]	Potenza assorbita [W]	corrente assorbita [A]	Giri elica [RPM]	Spinta [kgf]	Potenza assorbita [W]
50	0,02	100	0,01	1	/	/	/	/	/	/	/	/
50	0,07	200	0,04	3,5	0,08	200	0,07	4	0,13	200	0,11	6,5
50	0,09	300	0,08	4,5	0,16	300	0,15	8	0,29	300	0,24	14,5
50	0,16	400	0,11	8	0,29	400	0,29	14,5	0,62	400	0,43	31
50	0,22	500	0,17	11	0,53	500	0,45	26,5	1,24	500	0,64	62
50	0,33	600	0,23	16,5	1	600	0,66	50	2,62	600	0,94	131
50	0,52	700	0,33	26	1,51	700	0,85	75,5	/	/	/	/
50	0,82	800	0,49	41	2,8	800	1,18	140	/	/	/	/
50	1,14	900	0,59	57	3,2	850	1,28	160	/	/	/	/
50	1,67	1000	0,77	83,5	/	/	/	/	/	/	/	/
50	2,3	1100	0,9	115	/	/	/	/	/	/	/	/
50	2,9	1200	1,02	145	/	/	/	/	/	/	/	/

Tabella 15 Prove Thruster senza riduttore marcia avanti

Il passo su diametro pari a 1,4 ha prodotto pochi risultati in quanto la coppia per vincere un'inclinazione delle pale così generosa è obbligatoriamente abbondante. Le prove a marcia indietro sono previste in quanto i Thruster devono necessariamente girare in entrambi i sensi di marcia ed è stato capito, confrontando le due tabelle 15 e 16, che se l'elica può aspirare più acqua essa ha la capacità di spingere di più. Infatti



in queste prove è previsto che l'elica aspiri l'acqua verso il cilindro stagno e la mandi verso la parte del condotto aperta aspirando meno acqua del caso a marcia avanti come visibile nelle prove di tabella 16. In questo caso, e come gli altri casi a marcia indietro, è stato necessario collegare alla struttura un peso di circa 5kg in quanto la spinta era dal basso verso l'alto e la bilancia, nel momento in cui la spinta era pari o maggiore del peso della struttura, non percepiva più la differenza di peso.

Tensione [V]	MARCIA INDIETRO											
	THRUSTER ELICA P/D = 0,6				THRUSTER ELICA P/D = 1				THRUSTER ELICA P/D = 1,4			
	corrente assorbita [A]	Giri elica [RPM]	Spinta [kgf]	Potenza assorbita [W]	corrente assorbita [A]	Giri elica [RPM]	Spinta [kgf]	Potenza assorbita [W]	corrente assorbita [A]	Giri elica [RPM]	Spinta [kgf]	Potenza assorbita [W]
50	0,09	200	0,02	4,5	0,09	200	0,06	4,5	0,12	200	0,08	6
50	0,14	300	0,05	7	0,16	300	0,13	8	0,26	300	0,18	13
50	0,18	400	0,08	9	0,3	400	0,23	15	0,55	400	0,36	27,5
50	0,28	500	0,13	14	0,45	500	0,33	22,5	1,1	500	0,55	55
50	0,41	600	0,2	20,5	0,95	600	0,55	47,5	2,3	600	0,83	115
50	0,6	700	0,25	30	1,5	700	0,73	75	3,1	650	0,95	155
50	0,82	800	0,35	41	2,5	800	0,94	125	/	/	/	/
50	1,24	900	0,49	62	3,1	850	1,04	155	/	/	/	/
50	1,74	1000	0,59	87	/	/	/	/	/	/	/	/
50	2,28	1100	0,69	114	/	/	/	/	/	/	/	/

**Tabella 16 Prove Thruster senza riduttore marcia indietro**

Una analisi preliminare fa' notare subito che la spinta a marcia indietro è considerevolmente minore alla spinta a marcia avanti. Anche in questo caso sono state provate le stesse eliche della prova precedente e probabilmente a causa di fenomeni di rimbalzo delle armoniche non è stato possibile erogare più di 150W con una spinta davvero irrisoria che arriva al massimo a 1,04kg. Queste prove cadono in quella particolare situazione in cui conta molto di più la coppia della potenza. Infatti non è mai stata raggiunta la potenza nominale.

#### 4.2.1.2 Prove con riduttore

Per quanto riguarda le prove con il riduttore 1:5 ovvero 5 giri del motore equivalgono ad un giro dell'albero e delle eliche, queste sono state eseguite sulla stessa base di quelle precedenti, ma in questo caso la trasmissione non prevede parti plastiche. Infatti lo spinotto del riduttore è vincolato direttamente a uno spinotto rigido d'acciaio che trasmette il moto all'esterno passando dalla tenuta. Anche in

questo caso le prove sono state effettuate tutte a 50V, aumentando la velocità fino alla sima di consumo. L'elica con il passo su diametro pari a 1,4 anche se non è stato possibile valutarla fino a 1500giri al minuto, ha fornito importanti risultati con una spinta di 3,5kg con 250W erogati. In queste prove di tabella 17 le limitazioni sono state dettate dal numero di giri ammissibile sul riduttore nelle prove a P/D=0,6 in quanto a velocità angolari superiori di 8000 rpm era possibile una rottura del riduttore, mentre per gli altri P/D la limitazione è stata la stima di potenza di 250w da usare.

MARCIA AVANTI												
Numero di giri motore [RPM]	THRUSTER ELICA P/D = 0,6				THRUSTER ELICA P/D = 1				THRUSTER ELICA P/D = 1,4			
	Corrente [A]	Giri elica [RPM]	Spinta [kgf]	Potenza [W]	Corrente [A]	Giri elica [RPM]	Spinta [kgf]	Potenza [W]	Corrente [A]	Giri elica [RPM]	Spinta [kgf]	Potenza [W]
1000	0,08	100	0,01	4	0,07	100	0,02	3,5	0,09	100	0,03	4,5
1500	0,14	200	0,04	7	0,13	200	0,08	6,5	0,18	200	0,12	9
2000	0,22	300	0,09	11	0,22	300	0,16	11	0,295	300	0,24	14,75
2500	0,32	400	0,13	16	0,35	400	0,26	17,5	0,46	400	0,44	23
3000	0,45	500	0,18	22,5	0,51	500	0,39	25,5	0,73	500	0,65	36,5
3500	0,62	600	0,27	31	0,71	600	0,54	35,5	1,09	600	1	54,5
4000	0,7	700	0,35	35	0,97	700	0,85	48,5	1,55	700	1,39	77,5
4500	0,88	800	0,46	44	1,28	800	1,05	64	2	800	1,7	100
5000	1,09	900	0,53	54,5	1,63	900	1,38	81,5	2,7	900	2,11	135
5500	1,32	1000	0,74	66	2,08	1000	1,62	104	3,55	1000	2,65	177,5
6000	1,57	1100	0,8	78,5	2,65	1100	1,96	132,5	4,05	1100	3	202,5
6500	1,8	1200	1	90	3,3	1200	2,4	165	4,5	1200	3,2	225
7000	2,23	1300	1,2	111,5	4	1300	2,66	200	5	1300	3,5	250
7500	2,68	1400	1,4	134	5,04	1400	2,97	252	/	/	/	/
8000	3	1500	1,6	150	/	/	/	/	/	/	/	/

Tabella 17 Prove con riduttore marcia avanti

Infatti in queste prove sono stati settati i limiti di corrente, e quindi di potenza più alti di quelli nominali. Questo perché tutti gli avvolgimenti del motore erano immersi in olio e potevano disperdere il calore molto più facilmente in quanto si trovavano in una vasca e l'impiego prevede una condotta forzata di fluido che ne dissipa ulteriormente il calore prodotto. Anche in questo caso le prove a marcia indietro sono state eseguite con le stesse modalità di quelle senza riduttore a marcia indietro.

Quindi con un peso di 5kg che tiene immersa la struttura e con l'elica che aspira l'acqua dalla parte del cilindro stagno creando una forza che preme la struttura dal basso verso l'alto.

MARCIA INDIETRO												
Numero di giri motore [RPM]	THRUSTER ELICA P/D = 0,6				THRUSTER ELICA P/D = 1				THRUSTER ELICA P/D = 1,4			
	Corrente [A]	Giri elica [RPM]	Spinta [kgf]	Potenza assorbita [W]	Corrente [A]	Giri elica [RPM]	Spinta [kgf]	Potenza [W]	Corrente [A]	Giri elica [RPM]	Spinta [kgf]	Potenza [W]
1000	0,12	200	0,02	6	0,13	200	0,05	6,5	0,15	200	0,08	7,5
1500	0,2	300	0,05	10	0,22	300	0,12	11	0,26	300	0,18	13
2000	0,29	400	0,1	14,5	0,34	400	0,22	17	0,41	400	0,33	20,5
2500	0,41	500	0,15	20,5	0,5	500	0,34	25	0,6	500	0,53	30
3000	0,54	600	0,22	27	0,71	600	0,52	35,5	0,85	600	0,77	42,5
3500	0,7	700	0,32	35	0,97	700	0,76	48,5	1,16	700	1,04	58
4000	0,87	800	0,41	43,5	1,25	800	1,01	62,5	1,55	800	1,32	77,5
4500	1,07	900	0,53	53,5	1,63	900	1,26	81,5	2,03	900	1,62	101,5
5000	1,31	1000	0,65	65,5	2,1	1000	1,53	105	3	1000	1,95	150
5500	1,59	1100	0,79	79,5	2,6	1100	1,87	130	4	1100	2,3	200
6000	1,92	1200	0,96	96	3,2	1200	2,15	160	/	/	/	/
6500	2,27	1300	1,12	113,5	4	1300	2,5	200	/	/	/	/
7000	2,64	1400	1,25	132	/	/	/	/	/	/	/	/
7500	3,2	1500	1,4	160	/	/	/	/	/	/	/	/
8000	3,6	1600	1,53	180	/	/	/	/	/	/	/	/

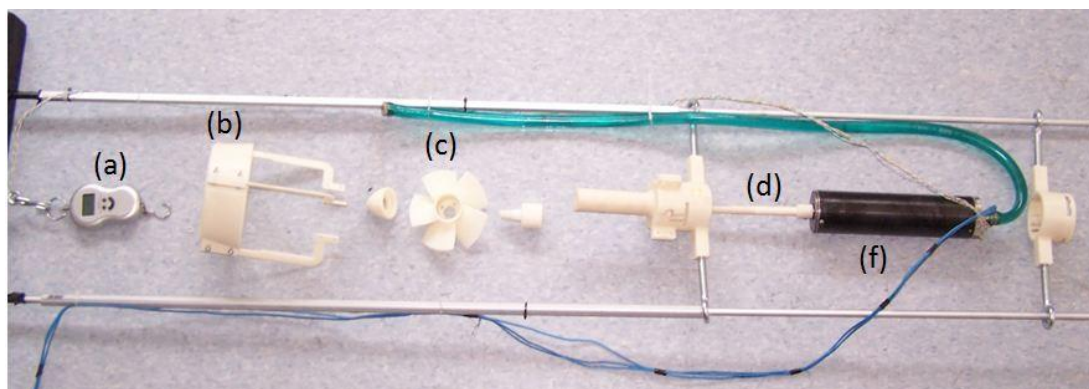
**Tabella 18 Prove con riduttore marcia indietro**

Ad ogni modo sono state soddisfacenti anche queste prove che con 200W e passo su diametro pari a 1 hanno consentito di ottenere una spinta di 2,5Kg.

#### 4.2.2 - Propulsione principale

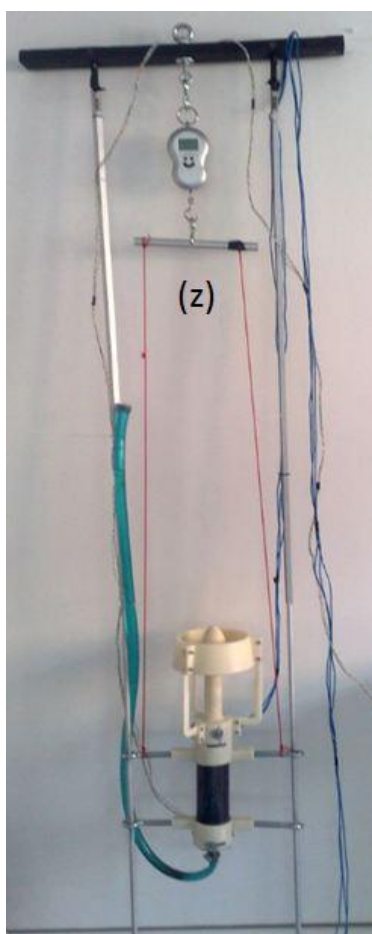
Per quanto riguarda le prove sui propulsori queste sono state eseguite con la stessa struttura delle prove sui Thruster e con lo stesso motore in quanto presentava lo stesso valore di coppia con il riduttore di quello utilizzato per la propulsione senza riduttore. Nella figura 57 è possibile vedere partendo da sinistra la bilancia(a), il mantello(b) che ingloba l'elica (c), lo spinotto (d) che consente di allontanare l'elica

dal cilindro stagno (f) che contiene il motore per poter valutare la spinta nelle condizioni più simili a quelle nominali.



**Figura 57 Esploso struttura prove per la propulsione**

La struttura montata (fig.58) presenta una sostanziale differenza, rispetto alla struttura dei Thruster per quello che riguarda il vincolo della bilancia alla struttura (z) in quanto se fosse stata collegata direttamente presentava una parte che premeva al mantello mantenendolo fuori centro.



**Figura 58 Struttura test per la propulsione**

Per quanto riguarda le prove vere e proprie sui propulsori esse sono state fatte con passi su diametro diversi rispetto a quelli sui Thruster e con eliche fisicamente diverse. In tabella 19 sono presenti i valori di prova a marcia avanti.

MARCIA AVANTI												
Numero di giri motore [RPM]	PROPULSIONE ELICA P/D = 1				PROPULSIONE ELICA P/D = 1,2				PROPULSIONE ELICA P/D = 1,4			
	Corrente [A]	Giri elica [RPM]	Spinta [kgf]	Potenza [W]	Corrente [A]	Giri elica [RPM]	Spinta [kgf]	Potenza [W]	Corrente [A]	Giri elica [RPM]	Spinta [kgf]	Potenza [W]
500	0,07	100	0,02	3,5	0,07	100	0,04	3,5	0,07	100	0,04	3,5
1000	0,14	200	0,1	7	0,14	200	0,13	7	0,14	200	0,18	7
1500	0,24	300	0,22	12	0,24	300	0,3	12	0,24	300	0,4	12
2000	0,37	400	0,4	18,5	0,39	400	0,54	19,5	0,41	400	0,71	20,5
2500	0,53	500	0,61	26,5	0,59	500	0,85	29,5	0,64	500	1,09	32
3000	0,75	600	0,89	37,5	0,85	600	1,23	42,5	0,98	600	1,66	49
3500	1,02	700	1,27	51	1,19	700	1,67	59,5	1,43	700	2,08	71,5
4000	1,32	800	1,7	66	1,6	800	2,18	80	2	800	2,81	100
4500	1,73	900	2,04	86,5	2,1	900	2,81	105	2,59	900	3,34	129,5
5000	2,16	1000	2,52	108	2,65	1000	3,46	132,5	3,25	1000	4,2	162,5
5500	2,65	1100	3	132,5	3,3	1100	4,25	165	4,2	1100	5,1	210
6000	3,23	1200	3,64	161,5	4,05	1200	5	202,5	/	/	/	/
6500	4	1300	4,05	200	/	/	/	/	/	/	/	/

**Tabella 19 Prove propulsori marcia avanti**

Infatti queste eliche presentano un mozzo molto più piccolo, quasi la metà di quelle dei Thruster, ed anche se è stato adottato un diametro identico adottando il mantello la spinta complessiva è risultata aumentata di quasi il 50%. Ottenendo una spinta simile nei due passi su diametro più abbondanti e di circa 5kg con 200w queste eliche provate differiscono di 500g rispetto alle eliche ideali con lo stesso passo su diametro.

Per quanto riguarda le prove a marcia indietro (tab.20) sono state effettuate solo sul passo su diametro che sembrava ottimale, passando da 5kg a 3,5kg. Questo è sicuramente dovuto come detto in precedenza ad una non simmetria della pala e ad un mantello che ottimizza la spinta in una sola direzione.

I dati sono stati presi collegando un peso alla struttura in quanto la spinta riusciva sicuramente a sollevare la struttura con il rischio che si sganciasse e cadesse in acqua.

MARCIA INDIETRO				
PROPULSIONE ELICA P/D = 1,2				
Numero di giri motore [RPM]	Corrente [A]	Giri elica [RPM]	Spinta [kgf]	Potenza [W]
500	0,07	100	0	3,5
1000	0,14	200	0,08	7
1500	0,24	300	0,2	12
2000	0,39	400	0,36	19,5
2500	0,6	500	0,57	30
3000	0,85	600	0,82	42,5
3500	1,2	700	1,18	60
4000	1,6	800	1,51	80
4500	2,17	900	1,93	108,5
5000	2,75	1000	2,28	137,5
5500	3,5	1100	2,85	175
6000	4,3	1200	3,5	215

**Tabella 20 Prove propulsori marcia indietro**

Una valutazione più precisa dei risultati ottenuti verrà fatta nel paragrafo seguente.

### 4.3 - Elaborazione dei dati

In questo paragrafo si analizzeranno i dati ottenuti dalle prove effettuate. Per semplicità sono state divise le prove in quella che è stata descritta precedentemente in marcia avanti, chiamata marcia "1", e prove a marcia indietro corrispondenti a marcia "2". Sono stati valutati i grafici che mettessero in corrispondenza la spinta ottenuta con la potenza utilizzata e la spinta con i relativi giri del motore. Inoltre è stato esposto il grafico che mette in relazione il coefficiente di spinta con il coefficiente di avanzamento e che descrive una retta a pendenza diversa relativamente alla elica usata.

Le prove per i Thruster senza riduttore hanno fornito grafici di tutto rispetto e che confermano la bontà delle prove effettuate. Analizzando le prove a marcia "1" (fig.59) è possibile valutare le seguenti parabole caratteristiche.

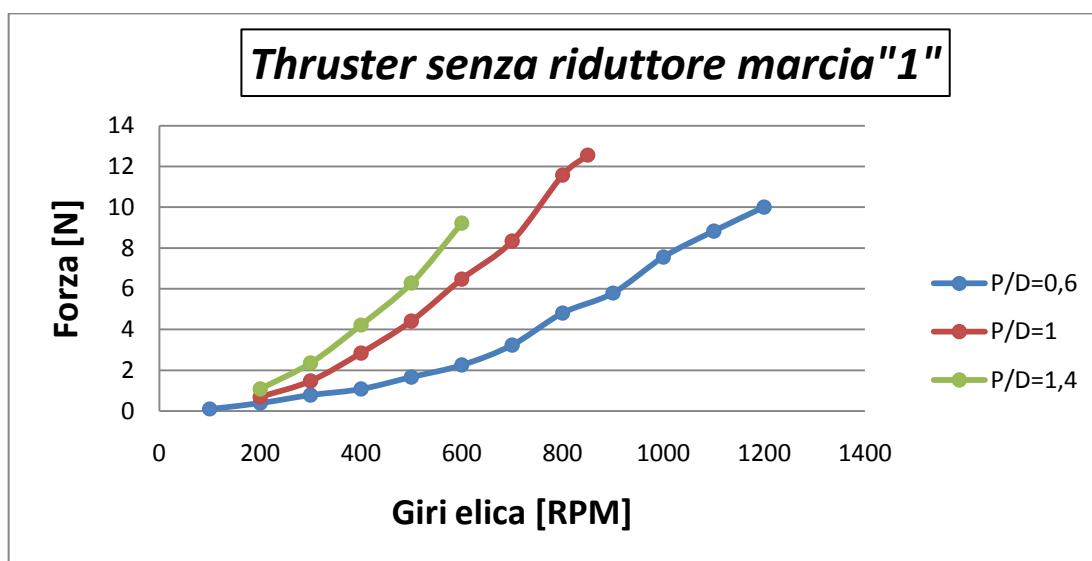


Figura 59 Thruster senza riduttore marcia "1" Forza/Giri elica

Infatti dal grafico spinta/giri elica era necessario aspettarsi una curva parabolica come descritto in precedenza nel paragrafo 4.1.3 Motori ed eliche. Le curve descritte da passi su elica diversi abbreviati P/D non descrivono nulla di nuovo rispetto a quanto era possibile attendere. Tale grafico mette in luce la spinta notevolmente maggiore del passo su elica intermedio pari a 1. Come detto in precedenza, il motore

brushless senza riduttore non ha consentito di raggiungere un buon numero di giri con una coppia frenante maggiore data da un P/D abbondante. Viceversa per un P/D troppo irrisorio le prove mettono in risalto una diminuzione della spinta dovuta alla divisione del flusso tagliato dalla elica, che ruota molto velocemente, e di tutti i moti turbolenti che ne derivano. Un'altro grafico saliente (fig.60) è quello che mette in relazione la spinta con la potenza erogata.

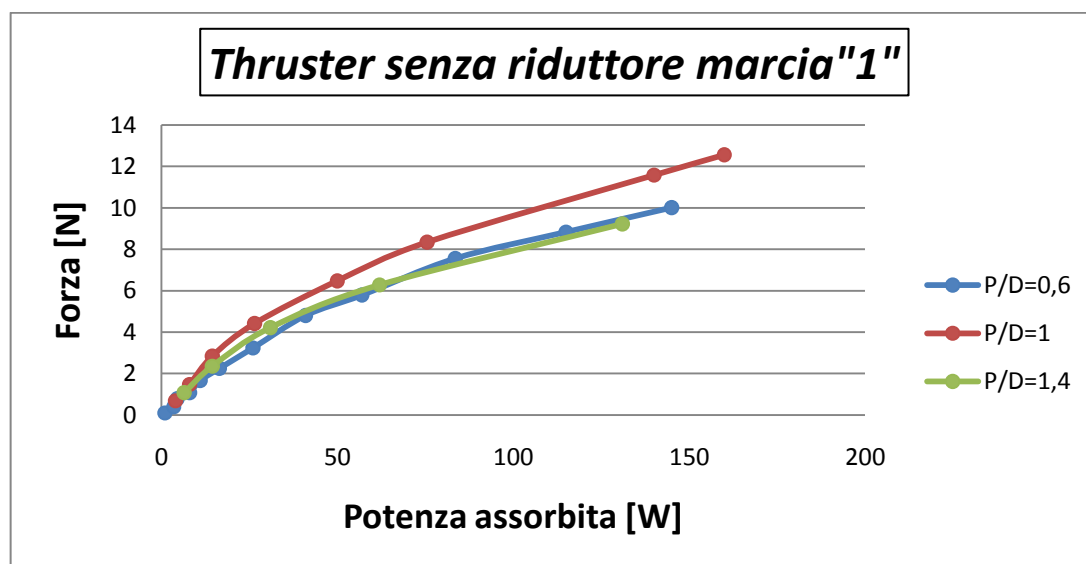


Figura 60 Thruster senza riduttore marcia "1" Forza /Potenza assorbita

Infatti un parametro saliente per la bontà del progetto è proprio la potenza necessaria al moto. Il grafico mette in luce il migliore passo su diametro provato e consente una comparazione a vista d'occhio su quelli che sono i consumi a parità di spinta. Chiaramente anche in questo caso il P/D pari a 1 risulta essere il migliore. Inoltre è possibile notare che tra le due eliche estreme, ovvero quella con P/D=0,6 e P/D=1,4, in un punto del grafico avviene una sovrapposizione con relativo incrocio. Questo perché a bassi giri il motore riesce a donare coppia all'elica da 1,4 e a spostare più fluido della 0,6 e di conseguenza essa risulta migliore, mentre per alti giri non riesce a "tirare" la girante, tanto è che il grafico si interrompe poiché non è in grado di ottenere valori a potenza più elevata.

Per quanto riguarda la prove a marcia "2"(fig.61) esse orientativamente forniscono valori decisamente meno performanti in quanto l'aspirazione rivolta verso il cilindro stagno impedisce una buona resa della girante in quanto ne limita il flusso.



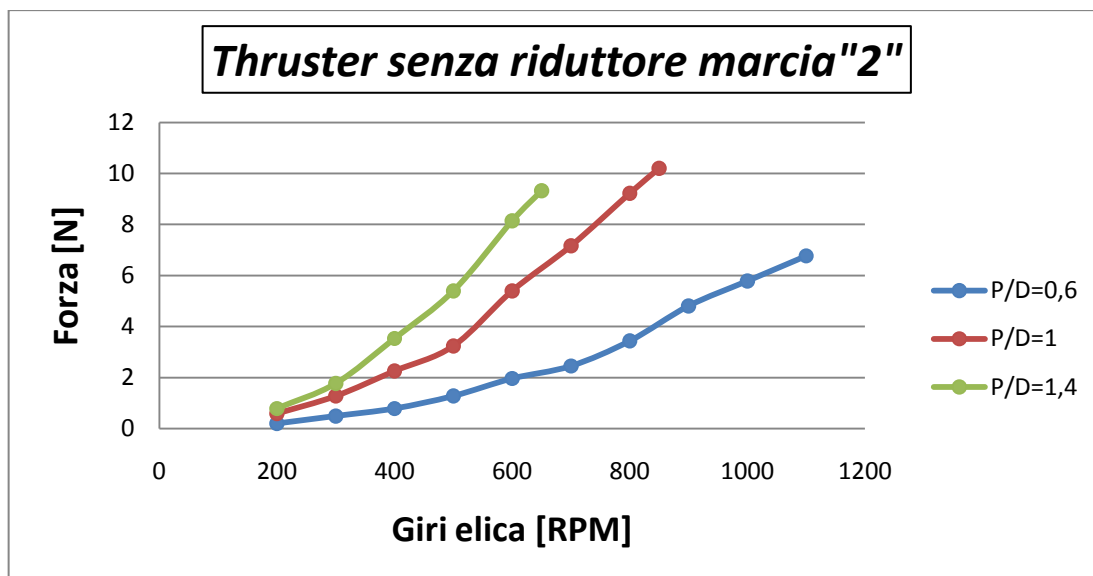


Figura 61 Thruster senza riduttore marcia "2" Forza /Giri elica

Il grafico con caratteristica spinta/giri elica anche in questo caso evidenzia un riscontro positivo con quello che era doveroso aspettarsi. In figura 62 la caratteristica potenza spinta.

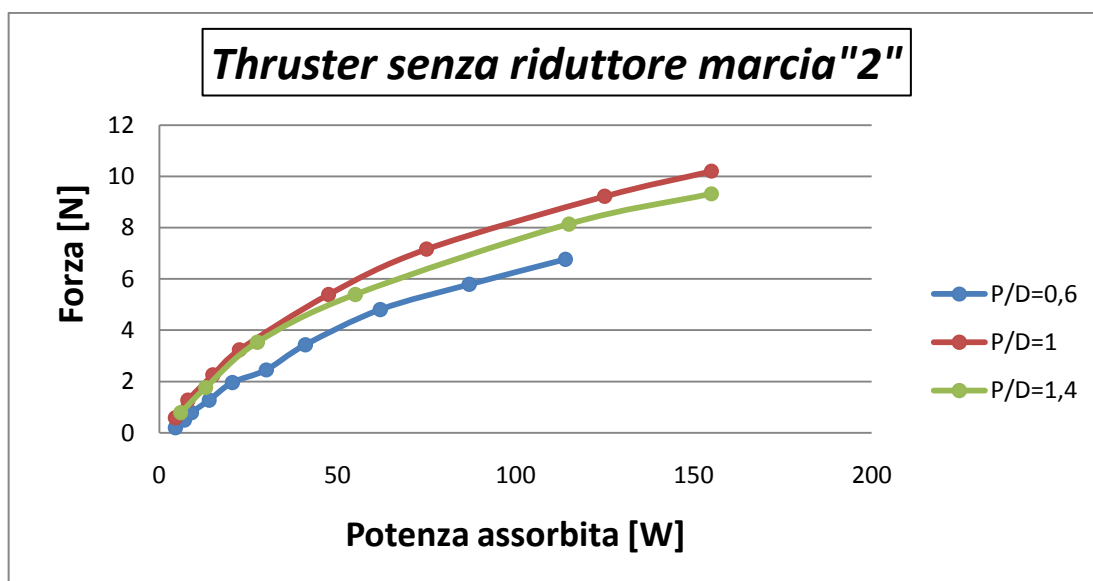


Figura 62 Thruster senza riduttore marcia "2" Forza /Potenza assorbita

Per quanto riguarda le prove per i Thruster con il riduttore esse rappresentano la scelta definitiva di progetto. I grafici di figura 63 e 64 che seguono rappresentano

ottimi risultati soprattutto nella caratteristica spinta/Potenza assorbita in quanto è possibile avvicinarci a 3,5kg di spinta corrispondenti a quasi 35N.

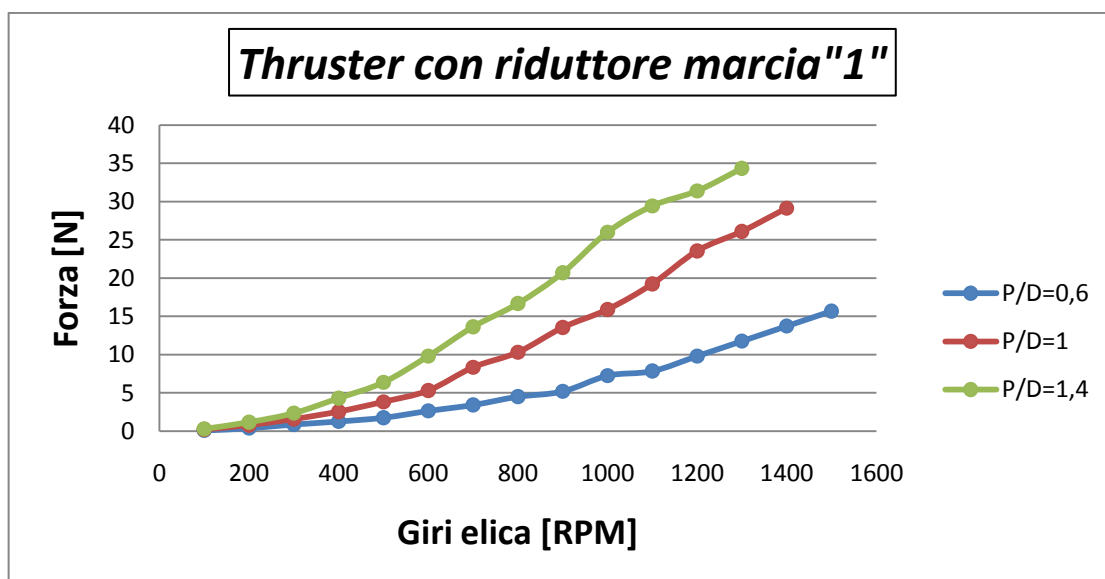


Figura 63 Thruster con riduttore 1:5 marcia "1" Forza/Giri elica

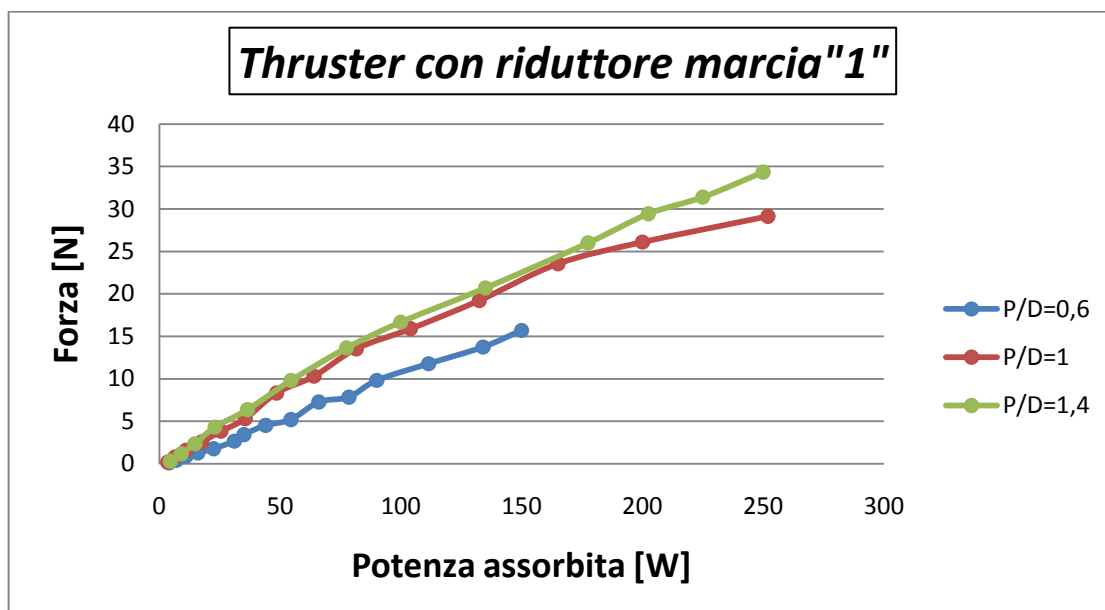


Figura 64 Thruster con riduttore 1:5 marcia "1" Forza /Potenza assorbita

Evidentemente sia dai grafici con riduttore che senza riduttore è possibile vedere una chiara dipendenza lineare della spinta alla potenza assorbita.

Le prove a marcia "2" di figura 65 e 66, pur avendo una abbondante coppia a disposizione, confermano i risultati ottenuti senza riduttore dove era stato affermato che una parziale otturazione del condotto di aspirazione per la girante provoca una sensibile riduzione della spinta.

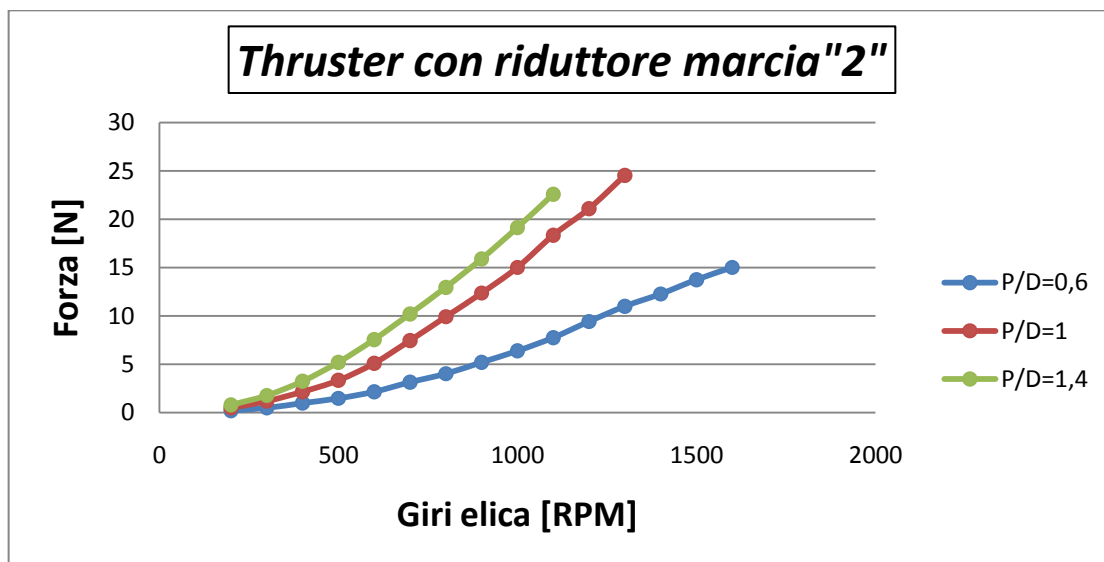


Figura 65 Thruster con riduttore 1:5 marcia "2" Forza /Giri elica

Nel grafico (fig.66) si hanno linee incrociate per quello che riguarda il P/D 1,4 e 1.

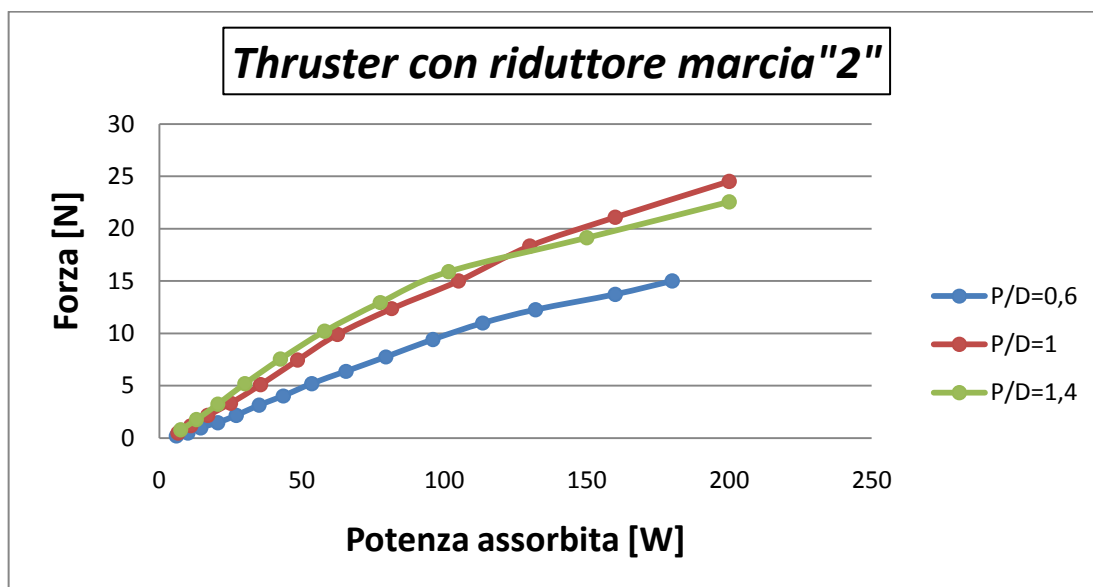


Figura 66 Thruster con riduttore 1:5 marcia "1" Forza /Potenza assorbita

Anche in questo caso la teoria delle eliche ammette una risposta certa, infatti per alti giri le eliche con P/D elevato non riusciranno ad avvitarci correttamente nell'acqua.

Un grafico importante (fig.67) per l'effettiva scelta progettuale è quello di comparazione della spinta con e senza riduttore subito sotto.

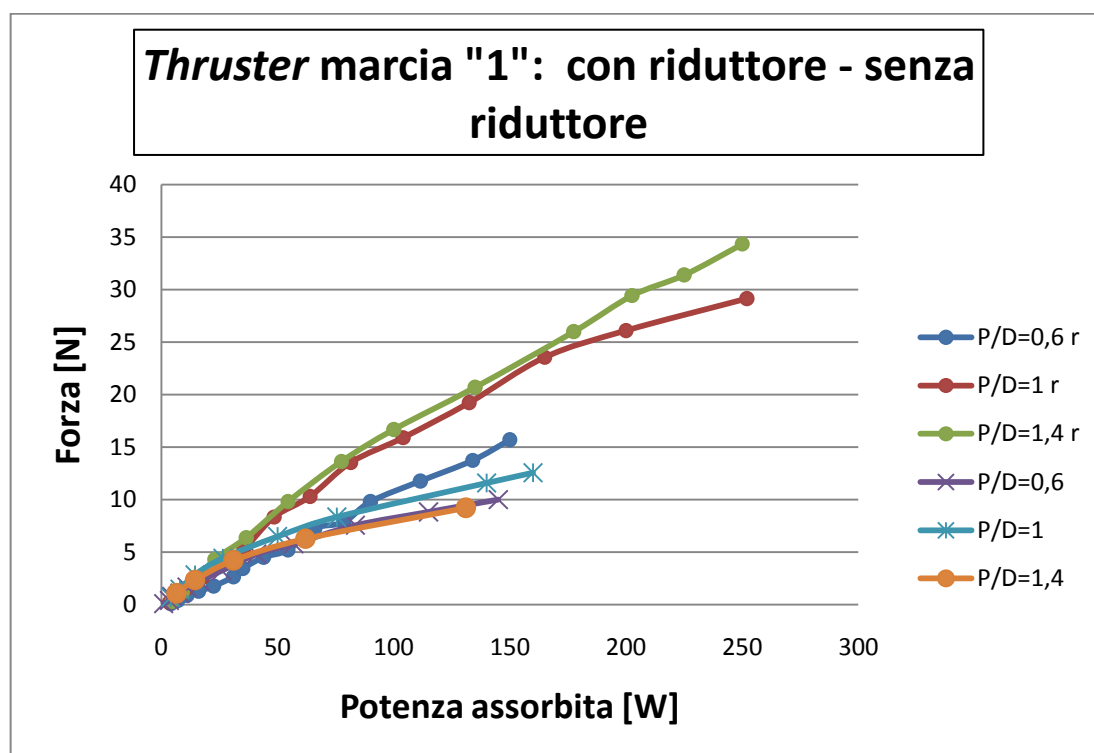


Figura 67 Thruster marcia "1" con e senza riduttore Forza /Potenza assorbita

Il grafico evidenzia come migliori la spinta ottenuta con il riduttore il cui ruolo è convertire il numero di giri in coppia permettendo di sfruttare le caratteristiche del motore. Di non facile rilievo è invece l'andamento appropriato delle curve caratteristiche senza riduttore. Tali curve mostrano un andamento non proporzionale tra potenza assorbita e spinta sicuramente dovuto alla coppia di attrito sulla tenuta crescente con il numero di giri e dipendente dalla oscillazione della girante causata dall'accoppiamento plastico tra il pernio del motore e lo spinotto usato in entrambi i casi. Evidente anche la potenza erogata che non riesce a superare i 150W a causa della coppia del motore senza riduttore.

Un'altro grafico importante (fig.68) mette in risalto la spinta con il senso di rotazione del motore.

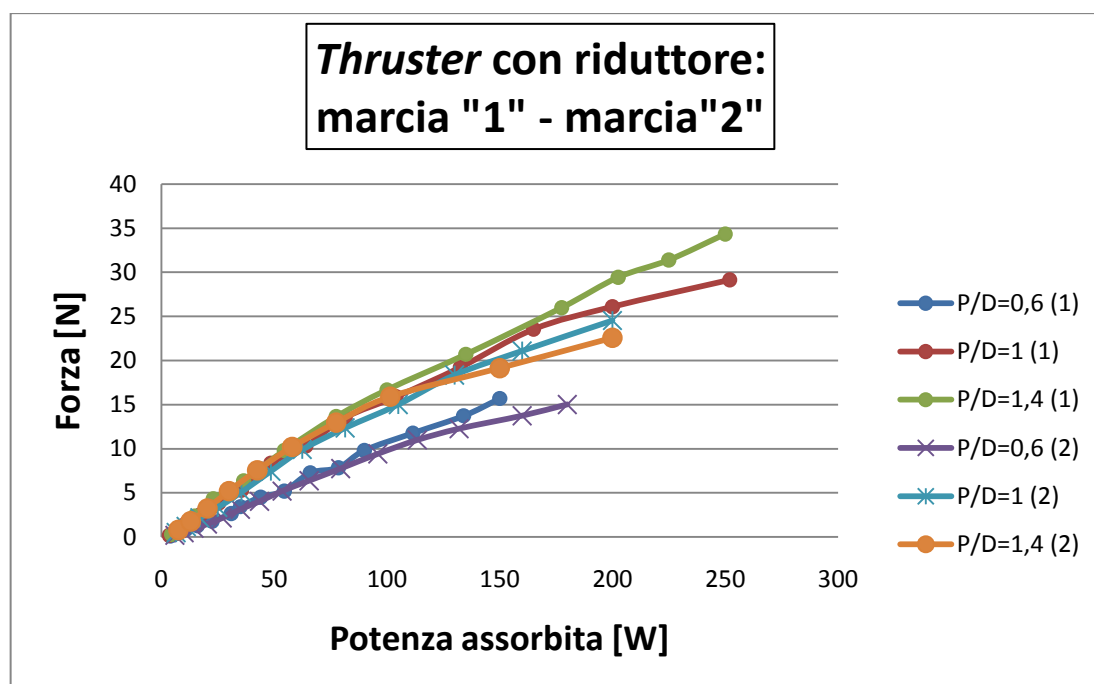


Figura 68 Thruster marcia "1" e marcia "2" con riduttore Forza /Potenza assorbita

In questo caso è possibile osservare l'andamento quasi direttamente proporzionale alla potenza assorbita. Il quasi è d'obbligo anche in questo caso in quanto tutto il riduttore immerso in olio crea una coppia di reazione che va aumentando con il numero di giri e limita la coppia globale disponibile sulla elica. Ovviamente è possibile anche vedere questa perdita come potenza dispersa per attriti e calcolare il nuovo rendimento del motore che varia abbondantemente caso per caso. Osservando attentamente le curve proposte è possibile notare che il P/D pari a 1 permette una spinta maggiore, in marcia "2", da circa i 120W erogati in poi rispetto al concorrente P/D pari a 1,4 che risulta essere il migliore in marcia "1". Sarà necessaria una valutazione precisa rispetto ad una stima del ruolo che dovrà assolvere il Thruster, ma chiaramente il P/D=1,4 risulta essere abbondantemente superiore in marcia "1".

Per quanto riguarda le prove sui propulsori principali (figura 69 e 70), queste, sono state fatte dando principale rilievo a marcia "1" ovvero nel senso di marcia "normale" in quanto il mantello è progettato appositamente per uno specifico senso di marcia. Anche le eliche, questa volta, sono state progettate con un profilo curvilineo e non simmetrico che ottimizzano la spinta in una direzione.

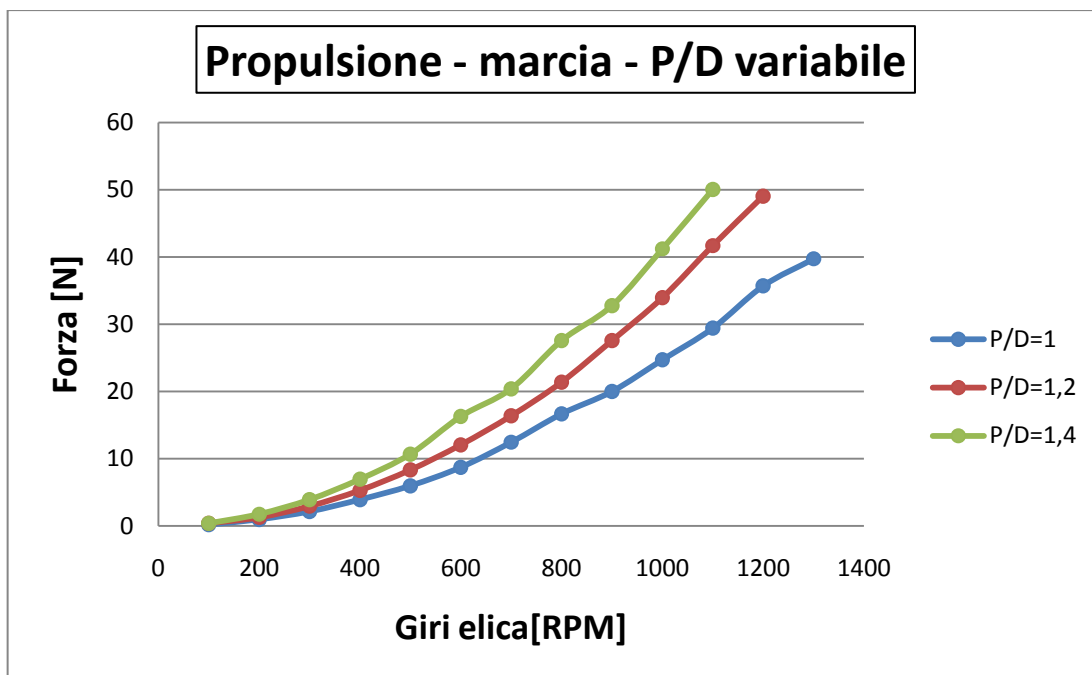


Figura 69 Propulsione marcia Forza /Giri elica

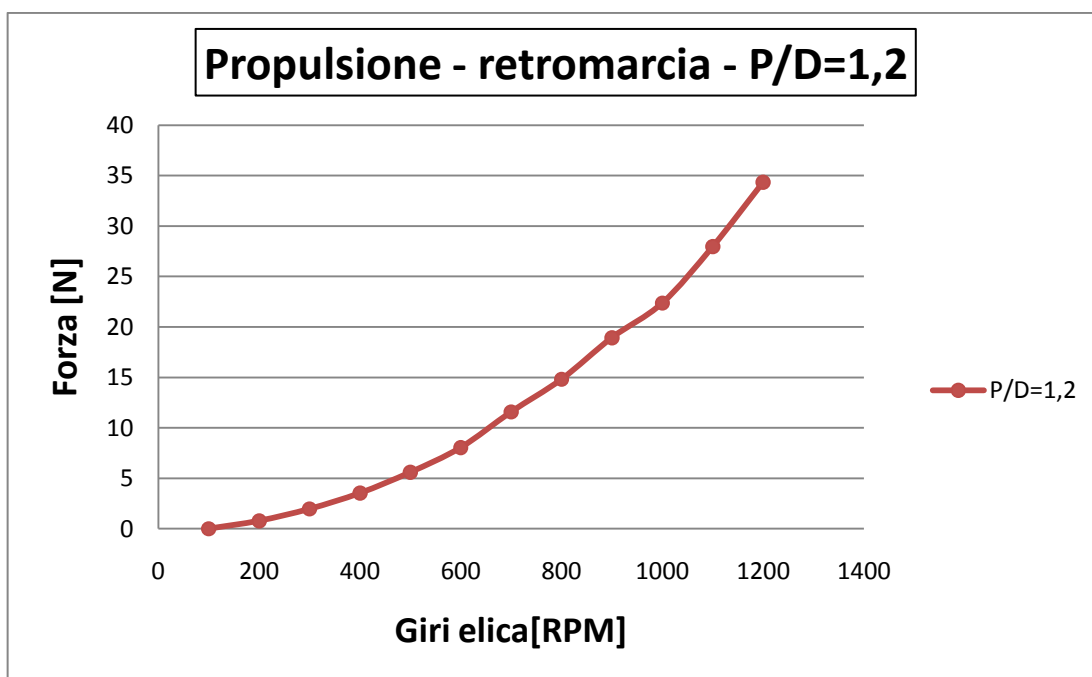


Figura 70 Propulsione retro marcia Forza /Giri elica

Per quanto riguarda la potenza utilizzata i grafici relativi sono quelli di figura 71 e 72.

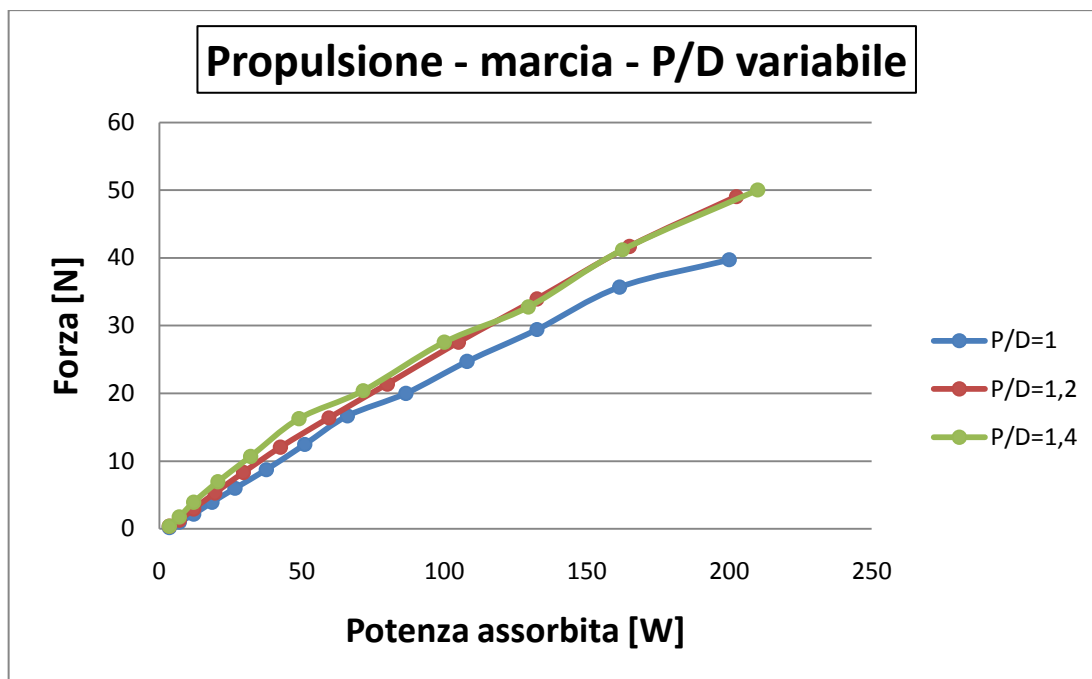


Figura 71 Propulsione marcia Forza /Potenza necessaria

I passi su diametro 1,2 e 1,4 in questo caso risultano estremamente simili e dopo aver valutato questi è stato deciso di ottenere un valore del coefficiente d'attrito dello scafo più preciso e valutare il migliore passo su diametro.

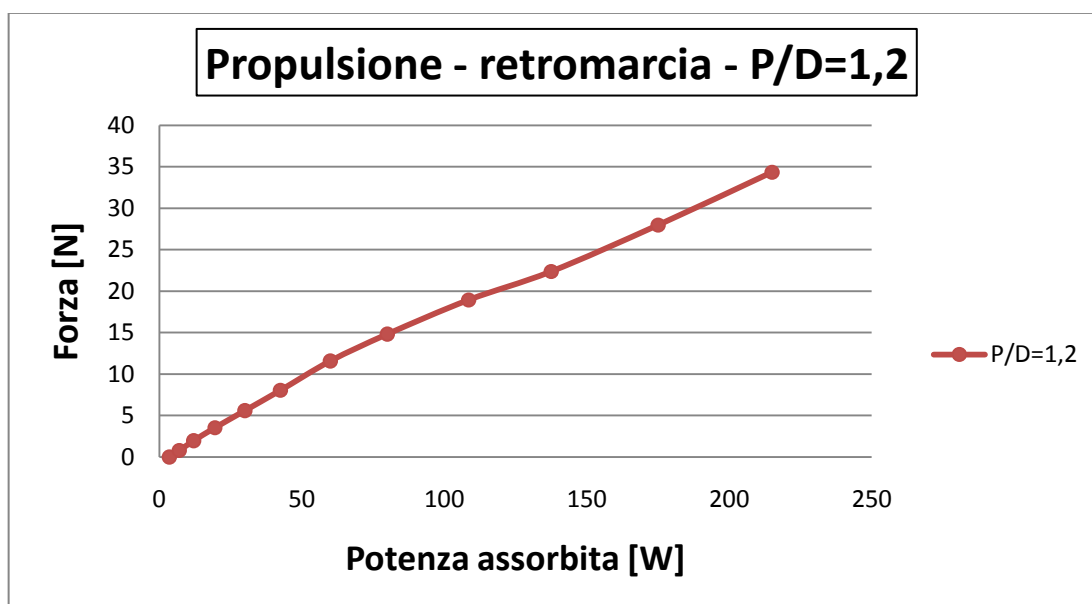


Figura 72 Propulsione marcia Forza /Potenza necessaria

Anche per quanto riguarda il grafico potenza assorbita in funzione della spinta in retromarcia esso rappresenta la bontà del mantello e dell'ottimizzazione delle eliche per il senso di marcia. I grafici seguenti (fig. 73 e 74) mettano in luce proprio questo fatto.

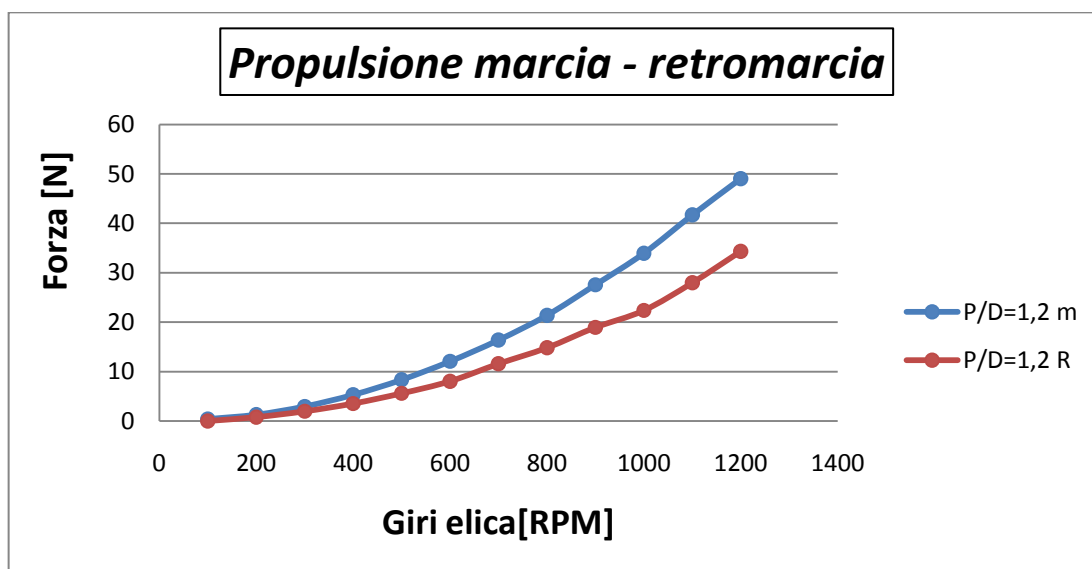


Figura 73 Propulsione marcia e retromarcia Forza /Giri elica P/D=1,2

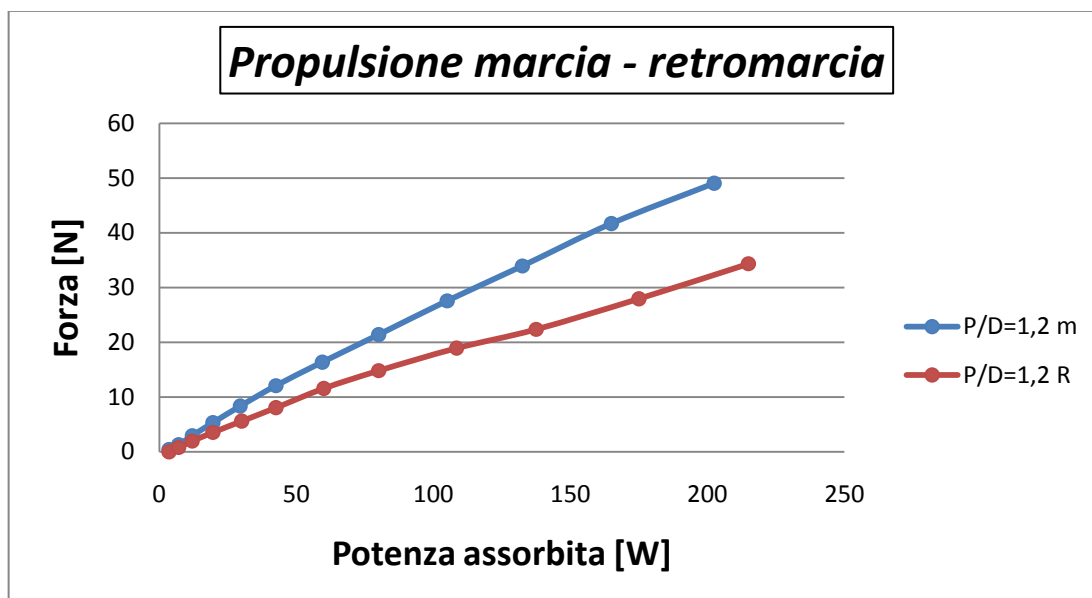
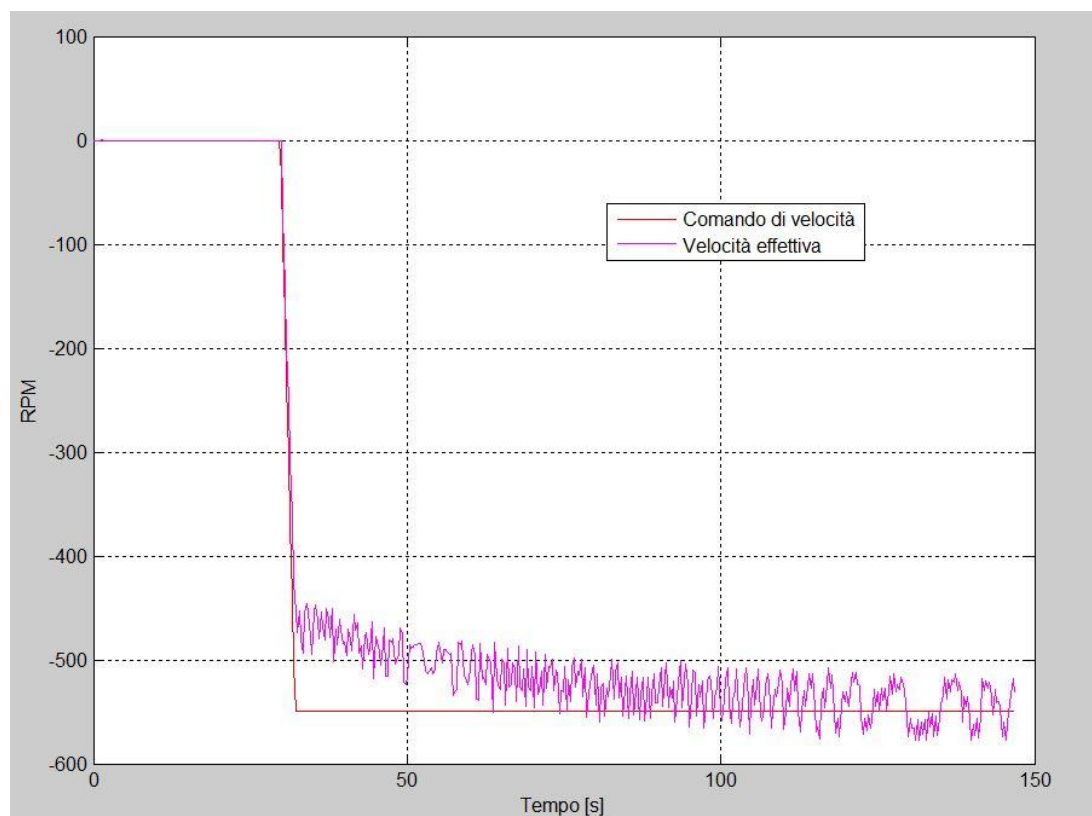


Figura 74 marcia e retromarcia Forza /Potenza assorbita elica P/D=1,2

Un'altra valutazione per stimare la bontà dell'inseguimento è stata fatta utilizzando il sistema di acquisizione dati del programma proprietario elmo descritto nel capitolo 3.



Con il software, e in modo abbastanza intuitivo, è stato possibile registrare istante per istante la velocità del motore in corrispondenza del comando di velocità ottenendo la caratteristica velocità/tempo (fig.75).



**Figura 75** Caratteristica tempo/comando di velocità e velocità effettiva

Per farlo è stato assegnato un evento di trigger negativo, in quanto la struttura di prova presentava il senso di rotazione a marcia avanti per valori considerati negativi dal programma, e un tempo di acquisizione. Tale tempo di acquisizione diminuiva aumentando il campionamento e per questo motivo il grafico presenta un fenomeno di aliasing abbondante dal centesimo secondo di acquisizione e facilmente visibile nella caratteristica della corrente (non presente). Il moto è probabilmente non correttamente inseguito in quanto l'alimentatore fornisce una potenza limitata e minore di quella necessaria in questa prova. Inoltre avendo usato cavi non schermati il segnale proveniente dai sensori Hall, dal quale l'azionamento risale alla velocità effettiva, è notevolmente disturbato.

# Conclusioni

Scopo di questa tesi era effettuare una progettazione preliminare del sistema di propulsione di un veicolo A.U.V. verificando sperimentalmente che le assunzioni fatte in fase di design fossero verificate.

Nell'ambito di questa tesi sono state svolte le seguenti attività:

- Individuazione delle specifiche di progetto relative a strumentazione e impianto elettrico.
- Progettazione preliminare del layout per la disposizione della strumentazione.
- Scelta dei principali componenti dell'impianto tra cui accumulatori di carica, azionamenti, e propulsori.
- E' stata realizzata una attrezzatura di prova ed i relativi prototipi che hanno consentito di verificare le effettive prestazioni del sistema di azionamento proposto e di ottimizzarne ulteriormente il dimensionamento, affinando le caratteristiche delle giranti da utilizzare.

Tutte le attività hanno avuto esito sostanzialmente positivo.

Lo schema a blocchi dei dispositivi installati fornirà la base per la progettazione dell'impianto elettrico di cui il dispositivo dovrà essere dotato.

La stima della potenza necessaria ha fornito elementi essenziali per la progettazione della potenza da installare e la ricerca della migliore tecnologia di accumulatori di carica, per il caso specifico, è stata sicuramente un aspetto fondamentale di tutto il lavoro svolto che ha portato ad un riesame dell'intero progetto, ma che rivela al contempo un'ottima durata di missione, affidabilità delle stesse e ha consentito una scelta di migliori dispositivi elettronici.

Il banco prova è stato l'elemento essenziale per la valutazione degli azionamenti ottenendo, assieme alle strutture di prova, dati riguardanti le spinte con eliche a passi diversi.

I significativi dati ricavati dalle prove hanno fornito elementi essenziali per la stima della velocità di marcia del veicolo Tifone consentendo di raggiungere una progettazione veritiera per i voluti 4 nodi di navigazione.

Le prospettive di studio riguardano soprattutto il disegno di ogni struttura e sezione del veicolo e una simulazione idrodinamica per ottenere il coefficiente di attrito dello scafo, ma sarà necessaria anche una schematizzazione unifilare con caratterizzazione dei pesi dei cavi adottati prima di poter partire con una raffinata e attenta realizzazione considerando ogni possibile evenienza.

---

# BIBLIOGRAFIA

- [1] Tutti i datasheet della strumentazione
- [2] Paolo Rossi. *"Storia della scienza moderna e contemporanea"*
- [3] Paola Paoli, Paolo Dapporto. *"Lezioni di chimica"*
- [4] [http://it.wikipedia.org/wiki/Accumulatore\\_di\\_carica\\_elettrica](http://it.wikipedia.org/wiki/Accumulatore_di_carica_elettrica)
- [5] [http://en.wikipedia.org/wiki/Rechargeable\\_battery](http://en.wikipedia.org/wiki/Rechargeable_battery)
- [6] Tabella 9 e 10 (Calcolo effettivo della densità di energia)
- [7] [http://it.wikipedia.org/wiki/Volano\\_%28batteria%29](http://it.wikipedia.org/wiki/Volano_%28batteria%29) (batteria a volano),
- [7] Cord-H Dustman. *"Advances in Zebra Batteries"*( Accumulatore ZEBRA).
- [8] [www.kokam.com](http://www.kokam.com)
- [9] Qin Chuan-li, Lu Xing, Yin Ge-ping, BAI Xu-duo, Jin Zheng. China 2009 *"Activated nitrogen-enriched carbon/carbon aerogel nanocomposites for supercapacitor application"* (da [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com))
- [10] [http://it.wikipedia.org/wiki/Accumulatore\\_litio-polimero](http://it.wikipedia.org/wiki/Accumulatore_litio-polimero)
- [11] [http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion\\_polymer\\_battery](http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_polymer_battery)
- [12] Sung Woo Lee, Sung Won Choi, Seong Mu Jo, Byung Doo Chin, Dong Young Kim, Kwan Young Lee. 2006 *"Electrochemical properties and cycle performance of electrospun poly-based fibrous membrane electrolytes for Li-ion polymer battery"*
- [13] <http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press/200708/07-0814E/index.html>
- [14] <http://www.sony.it/product/vn-s-series/vpcsb1a9e>

- 
- [15] Y.H. Liao, M.M. Rao, W.S. Li, L.T. Yang, B.K. Zhu, R. Xu, C.H. Fu. 2010  
"Fumed silica-doped poly(butyl methacrylate-styrene)-based gel polymer electrolyte  
for lithium ion battery"
- [16] Prof. Ing Lorenzo Capineri dispense di Laboratorio di elettronica industriale
- [17] [http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion\\_battery#cite\\_note-4](http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery#cite_note-4)
- [18] [www.lipobattery.it](http://www.lipobattery.it)
- [17] <http://www.lipobattery.it/it/tecnologia-li-po/kart.html>
- [18] [http://www.kokam.com/english/product/kokam\\_Lipo\\_01.html](http://www.kokam.com/english/product/kokam_Lipo_01.html)
- [19] <http://www.elmomc.com/>
- [20] [http://www.elmomc.com/applications/applications-example01-01.htm#simple\\_case](http://www.elmomc.com/applications/applications-example01-01.htm#simple_case)
- [21] Benedetto Allotta 2010, appunti del corso "*Robotica industriale*"
- [22] [http://www.lavoro.gov.it/NR/rdonlyres/0D78BF49-8227-45BA-854F-064DE686809A/0/20080409\\_Dlgs\\_81.pdf](http://www.lavoro.gov.it/NR/rdonlyres/0D78BF49-8227-45BA-854F-064DE686809A/0/20080409_Dlgs_81.pdf)
- [23] [http://www.elettricapollino.it/CEI\\_04.htm](http://www.elettricapollino.it/CEI_04.htm)
- [24] <http://webstore.uni.com/unistore/public/productdetails?productId=UNINI1013300!EIT>
- [25] <http://www.ceiweb.it/>, <http://www.uni.com>
- [26] John Carlton 2007. "*linee propellers and propulsion*"

## Ringraziamenti

Un ringraziamento va a tutte quelle persone che hanno creduto in me, alla mia famiglia che mi è stata vicino, a Enrico che è riuscito a sbloccarmi per il primo esame, ma anche alle persone con cui ho potuto condividere questa bellissima esperienza universitaria e che sono riusciti a renderla magica, quindi a tutti i miei amici e compagni con i quali è stato possibile condividere le proprie passioni senza sentirsi fuori luogo, al mio correlatore che vedo prima come simpaticissima persona e poi come ottimo compagno di lavoro, a tutti i simpatici ragazzi del laboratorio Pistoiese, al mio relatore che mi ha permesso di realizzare uno dei sogni che avevo fin da bambino: quello di sedermi ad una tavola rotonda e partecipare attivamente alle scelte di un progetto reale e infine realizzarlo! Un ringraziamento particolare va a Francesca che mi ha trasmesso tanto amore e che mi ha sempre appoggiato in tutti i miei stravaganti progetti di questi anni.

