

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

SEDE DI FORLI

CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA AEROSPAZIALE

CLASSE L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA IN

Meccanica del volo

**STUDIO DELLE PRESTAZIONI E
CALCOLO DELLA POTENZA IN FUNZIONE DEL PESO DI
UN ELICOTTERO A
PILOTAGGIO REMOTO**

CANDIDATO

Donato Arcuti

RELATORE

Prof. Ing. Fabrizio Giulietti

CORRELATORE

Ing. Matteo Turci

Anno Accademico 2016/2017

I SESSIONE

INDICE

INDICE DELLE FIGURE INDICE DELLE TABELLE

| | |
|--|----|
| 1.INTRODUZIONE | 1 |
| 2. REGOLAMENTO ENAC | 2 |
| 2.1 Il quadro internazionale..... | 2 |
| 2.2 Gli aeromobili e i SAPR per il codice della navigazione italiana | 2 |
| 2.3 L'abilitazione per i piloti commerciali di SAPR..... | 3 |
| 3. L' ELICOTTERO E MECCANICA DI BORDO | |
| 3.1 Meccanica di bordo " il rotore" | 3 |
| 3.2 I controlli | 5 |
| 4. DESCRIZIONE DELL'ELICOTTERO IN ESAME | |
| 4.1 Frame | 8 |
| 4.2 Batterie Lipo..... | 9 |
| 4.3 Avionica..... | 10 |
| 4.3.1 Ricevente..... | 10 |
| 4.3.2 Trasmittente..... | 11 |
| 4.3.3 Servocomandi | 12 |
| 4.3.4 Autopilot Wookong Ace One | 13 |
| 4.3.5 GPS | 28 |
| 4.4 Sistema Propulsivo..... | 29 |
| 4.4.1 ESC..... | 29 |
| 4.4.1.1 BEC | 30 |
| 4.4.2 Motore brushless | 31 |
| 4.4.3 Schema di collegamento Autopilota batteria servi e ricevente | 33 |
| 4.4.4 Elica | 34 |
| 5 PREPARAZIONE ELICOTTERO PER ATTIVITA' SPERIMENTALE | |
| 5.1 Wattmetro | 37 |
| 5.2 Arduino..... | 39 |
| 5.2.1 Programma Arduino..... | 40 |
| 5.3 Calibrazione..... | 42 |
| 6 ATTIVITA' SPERIMENTALE | 45 |
| 7 CALCOLO FIGURA DI MERITO | 56 |
| 8 STIMA DELL' AUTONOMIA ORARIA | 59 |
| 9. CONCLUSIONI | 65 |

INDICE DELLE FIGURE

| | |
|---|----|
| Figura 1 Elicottero spia USA a pilotaggio remoto..... | 2 |
| Figura 2 Velivolo ad Ala Fissa a pilotaggio remoto..... | 2 |
| Figura 3 Schematizzazione cerniera di flappeggio e brandeggio..... | 4 |
| Figura 4 Struttura rotore con cerniera di cambio passo..... | 5 |
| Figura 5 Asse verticale, longitudinale, laterale elicottero..... | 6 |
| Figura 6 Frame Goblin 570..... | 8 |
| Figura 7 Batteria Lipo 22.2V 6s..... | 9 |
| Figura 8 Ricevente Futaba R6014 HS..... | 10 |
| Figura 9 Trasmittente Futaba..... | 11 |
| Figura 10 Servo Goblin 570..... | 13 |
| Figura 11 In successione: GPS, Centralina, controllo inerziale + giroscopio..... | 13 |
| Figura 12 Led esterno indicante lo stato di funzionamento del sistema..... | 14 |
| Figura 13 Ace One Autopilot Flight Testing..... | 15 |
| Figura 14 Introduzione alla programmazione dell'autopilota..... | 16 |
| Figura 15 Prima schermata Autopilota..... | 17 |
| Figura 16 Seconda schermata Autopilota..... | 18 |
| Figura 17 Schermata calibrazione trasmettente..... | 19 |
| Figura 18 Schermata 3 Autopilota..... | 20 |
| Figura 19 Elicottero con rotore Flybar..... | 20 |
| Figura 20 Elicottero con rotore Flybarless..... | 20 |
| Figura 21 Schermata 4 Autopilota..... | 21 |
| Figura 22 Schermata 4 Autopilota: Configurazione pitch e throttle..... | 22 |
| Figura 23 Comando rotore di coda Goblin 570..... | 22 |
| Figura 24 Schermata 5 Autopilota..... | 23 |
| Figura 25 Schermata 6 Autopilota..... | 24 |
| Figura 26 Schermata 7 Autopilota..... | 25 |
| Figura 27 Schermata 8 Autopilota..... | 26 |
| Figura 28 Schermata 9 Autopilota..... | 27 |
| Figura 29 Parametri suggeriti per impostazione Autopilota..... | 28 |
| Figura 30 Ricevitore GPS..... | 28 |
| Figura 31 Esempio di modulazione digitale PWM (Pulse Width Modulation)..... | 29 |
| Figura 32 ESC con corrente massima da 100 A utilizzata per il Goblin 570..... | 30 |
| Figura 33 Schema tipico di collegamento Batteria ESC Motore Ricevente e servocomandi..... | 31 |
| Figura 34 Statore motore brushless X-NOVA 1025 Kv..... | 31 |
| Figura 35 Motore X-NOVA 4025/1.5Y-1120KV 8P con caratteristiche tecniche..... | 32 |
| Figura 36 Schema di collegamento Autopilota..... | 33 |
| Figura 37 Goblin 570 per attività sperimentale..... | 37 |
| Figura 38 Wattmetro..... | 38 |

| | |
|---|----|
| <i>Figura 39</i> Arduino con scheda SD..... | 39 |
| <i>Figura 40</i> Schema a blocchi utilizzato per calibrazione Arduino..... | 42 |
| <i>Figura 41</i> Grafico della calibrazione in tensione del wattmetro con relativi valori p1 e p2..... | 43 |
| <i>Figura 42</i> Grafico della calibrazione in corrente del wattmetro con relativi valori p1 e p2..... | 44 |
| <i>Figura 43</i> Caratteristiche pale thunderbolt..... | 45 |
| <i>Figura 44</i> Grafico dei watt in funzione del tempo Payload 3 Kg Original Blade..... | 46 |
| <i>Figura 45</i> Grafico degli RPM in funzione del tempo 3 Kg Payload Original Blade..... | 47 |
| <i>Figura 46</i> Grafico del confronto tra watt e RPM in funzione del tempo 3 Kg Payload Original Blade..... | 47 |
| <i>Figura 47</i> Grafici di scarica della batteria: Tensione in funzione degli Ampere..... | 48 |
| <i>Figura 48</i> Grafico dell'intervallo di hovering per il calcolo dei watt in funzione del tempo..... | 48 |
| <i>Figura 49</i> Grafico Watt in funzione del MTOW nelle due configurazioni: in rosso la curva delle Thunderbolt Blade mentre in blu la curva delle Original Blade..... | 54 |
| <i>Figura 50</i> Diagramma Potenza-Peso interpolato con Curve Fitting Original Blade..... | 55 |
| <i>Figura 51</i> Diagramma Potenza-Peso interpolato con Curve Fitting Thunderbolt Blade..... | 55 |
| <i>Figura 52</i> Dimensioni Goblin 570..... | 56 |
| <i>Figura 53</i> Plottaggio figura di merito in funzione del MTOW..... | 57 |
| <i>Figura 54</i> Curve Fitting Figura di Merito Original Blade..... | 58 |
| <i>Figura 55</i> Curve Fitting Figura di Merito Thunderbolt Blade..... | 58 |
| <i>Figura 56</i> Autonomia oraria in funzione della capacità della batteria Original Blade..... | 61 |
| <i>Figura 57</i> Autonomia oraria in funzione della capacità della batteria Thunderbolt Blade..... | 62 |
| <i>Figura 58</i> Autonomia oraria in funzione del MTOW_OB..... | 63 |
| <i>Figura 59</i> Autonomia oraria in funzione del MTOW_TB..... | 64 |

INDICE DELLE TABELLE

| | |
|--|----|
| <i>Tabella 1 - Risultati per 0 Kg Payload</i> | 49 |
| <i>Tabella 2 - Risultati per 1 Kg Payload</i> | 50 |
| <i>Tabella 3 - Risultati per 2 Kg Payload</i> | 50 |
| <i>Tabella 4 - Risultati per 3 Kg Payload</i> | 51 |
| <i>Tabella 5 - Risultati per 4 Kg Payload</i> | 52 |
| <i>Tabella 6 - Max Takeoff Weight Original Blade</i> | 52 |
| <i>Tabella 7 - Max Takeoff Weight Thunderbolt Blade</i> | 53 |
| <i>Tabella 8 - Potenza assorbita con Original e Thunderbolt Blade in funzione del MTOW</i> | 52 |
| <i>Tabella 9 - Figura di merito per i valori di MTOW</i> | 57 |
| <i>Tabella 10 - Peso batterie con Capacità</i> | 60 |
| <i>Tabella 11 - MTOW_{OB} in base alla batteria utilizzata</i> | 63 |
| <i>Tabella 12 - MTOW_{TB} in base alla batteria utilizzata</i> | 64 |
| <i>Tabella 13 - Risultati conclusivi</i> | 65 |

1.INTRODUZIONE

L'idea di cimentarsi nel brivido di pilotare un aereo, un drone o un elicottero a pilotaggio remoto è all'ordine del giorno. Questi velivoli, oltre ad essere utilizzati a scopo puramente aeromodellistico, sono anche impiegati per scopi lavorativi e di ricerca.

L'idea di un velivolo a pilotaggio remoto si sviluppa negli anni 30' negli Stati Uniti grazie all'ingegnere britannico Reginald Denny che portò il suo "modello radiocomandato" all'Esercito Americano. Inizialmente non riscosse successo tra le autorità, infatti venne utilizzato come semplice bersaglio nelle esercitazioni militari. Nel periodo intermedio tra le due guerre mondiali, lo sviluppo tecnologico permise agli eserciti di convertire alcuni aerei in SARP (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto), con il vantaggio di fargli compiere missioni ad alto rischio per l'incolumità dell'uomo.

Negli ultimi anni, le tecnologie legate allo sviluppo di sistemi SARP (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto) sono cresciute rapidamente. In particolare, lo sviluppo tecnologico nell'ambito della sensoristica permette di equipaggiare SARP con molteplici carichi nello spettro del visibile (camere digitali compatte o professionali), dell'infrarosso (camere termiche) e delle camere multi spettrali, fino ad arrivare a sensori più evoluti come ad esempio i sensori Lidar o per il monitoraggio della qualità dell'aria.

È però estremamente importante ricordare che l'utilizzo dei SARP in ambito civile non va sempre subordinato alla regolamentazione presente nel Paese in cui si ha intenzione di operare.

Di seguito vengono presentate alcune applicazioni in ambito civile per i SARP:

- *Monitoraggio siti Archeologici, contro la depredazione e il commercio illegale di reperti*
- *Telerilevamento*
- *Aerofotogrammetria e rilievo dell'architettura*
- *Monitoraggio ambientale e calamità naturali*
- *Biodiversità e monitoraggio fauna*
- *Operazioni di ricerca e soccorso*
- *Videoriprese e fotografie in generale*



Figura 1- Elicottero spia USA a pilotaggio remoto



Figura 2 Velivolo ad Ala Fissa a pilotaggio remoto

2. REGOLAMENTO ENAC

2.1 Il quadro internazionale

L'ICAO riconosce molte categorie di aeromobili con pilota a bordo (manned) o senza (unmanned), dando a tutte lo status di “aeromobile”. Anche un SAPR è quindi un aeromobile e i concetti normativi non subiscono alterazioni di principio circa il velivolo, il pilota e l'operatore (valgono le stesse responsabilità e certificazioni, come certificato di immatricolazione, certificato di aeronavigabilità, licenza di pilota, licenza di operatore). In particolare esiste un quadro normativo generale applicabile, tuttavia un insieme di norme implementative adeguate è in fase di definizione. I SAPR di peso inferiore ai 150 kg sono di pertinenza delle singole autorità aeronautiche nazionali, l'ENAC in Italia, come stabilito nei regolamenti europei.

2.2 Gli aeromobili e i SAPR per il codice della navigazione italiana

Il 17 luglio 2015 viene pubblicata da parte dell'Ente nazionale per l'aviazione civile la nuova normativa sui Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto, con diverse novità rispetto al regolamento precedente.

Di seguito si riportano alcuni degli articoli rilevanti estratti dal codice della navigazione.

1. *L'articolo 743 del Codice della Navigazione “Nozione di aeromobile” prevede, nella definizione di aeromobile, i mezzi aerei a pilotaggio remoto: “Per aeromobile si intende ogni*

macchina destinata al trasporto per aria di persone o cose. Sono altresì considerati aeromobili i mezzi aerei a pilotaggio remoto, definiti come tali dalle leggi speciali, dai regolamenti dell'ENAC e, per quelli militari, dai decreti del Ministero della Difesa. Le distinzioni degli aeromobili, secondo le loro caratteristiche tecniche e secondo il loro impiego, sono stabilite dall'ENAC con propri regolamenti e, comunque, dalla normativa speciale in materia”.

2. I mezzi aerei a pilotaggio remoto impiegati o destinati all'impiego in operazioni specializzate o in attività scientifiche, sperimentazione e ricerca, costituiscono i Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR) e ad essi si applicano le previsioni del Codice della Navigazione secondo quanto previsto dal presente Regolamento.

2.3 L'abilitazione per i piloti commerciali di SAPR

Chi pilota da remoto un SAPR ha, dal punto di vista normativo, le stesse caratteristiche e responsabilità che ha di chi pilota un aeromobile da bordo. Ciò significa che i piloti di SAPR adibiti a lavoro aereo devono essere dotati di apposite licenze rilasciate da ENAC dopo un'adeguata e comprovata formazione.

3. L' ELICOTTERO E MECCANICA DI BORDO

3.1 Meccanica di bordo “il rotore”

Il rotore principale di un elicottero ha la funzione di fornire la forza sustentatrice e propulsiva, nonché le coppie di rollio e di beccheggio necessarie per il controllo longitudinale e trasversale. Il rotore è collegato attraverso delle biellette al piatto oscillante, che è a sua volta collegato ad attuatori idraulici che ne permettono il movimento.

I parametri geometrici principali del rotore sono:

- Il numero delle pale
- La forma delle pale: sezione, allungamento, rapporto di rastremazione, svergolamento
- La forma del profilo: spessore e curvatura.

Le pale del rotore sono collegate al mozzo per mezzo di tre cerniere per limitare le notevoli sollecitazioni di flessione alla radice delle pale, e per ridurre in fase di volo in avanzamento il momento meccanico di rollio dovuto alla maggiore velocità della pala avanzante rispetto a quella arretrante.

Le tre cerniere sono:

- **Cerniera di flappeggio:** consente il movimento della pala in un piano determinato dal suo asse longitudinale e dall'asse di rotazione del rotore. In genere, il movimento attorno all'asse di flappeggio è completamente libero.
- **Cerniera di brandeggio:** consente la riduzione delle sollecitazioni di flessione nel piano della pala. Consente quindi il movimento sull'asse normale al disco del rotore. A differenza dell'asse di flappeggio, il movimento è contrastato da smorzatori.



Figura 3 - Schematizzazione cerniera di flappeggio e brandeggio

- **Cerniera di torsione:** serve a variare il passo della pala (ovvero l'angolo di incidenza del profilo della pala) ed è controllato dal pilota.

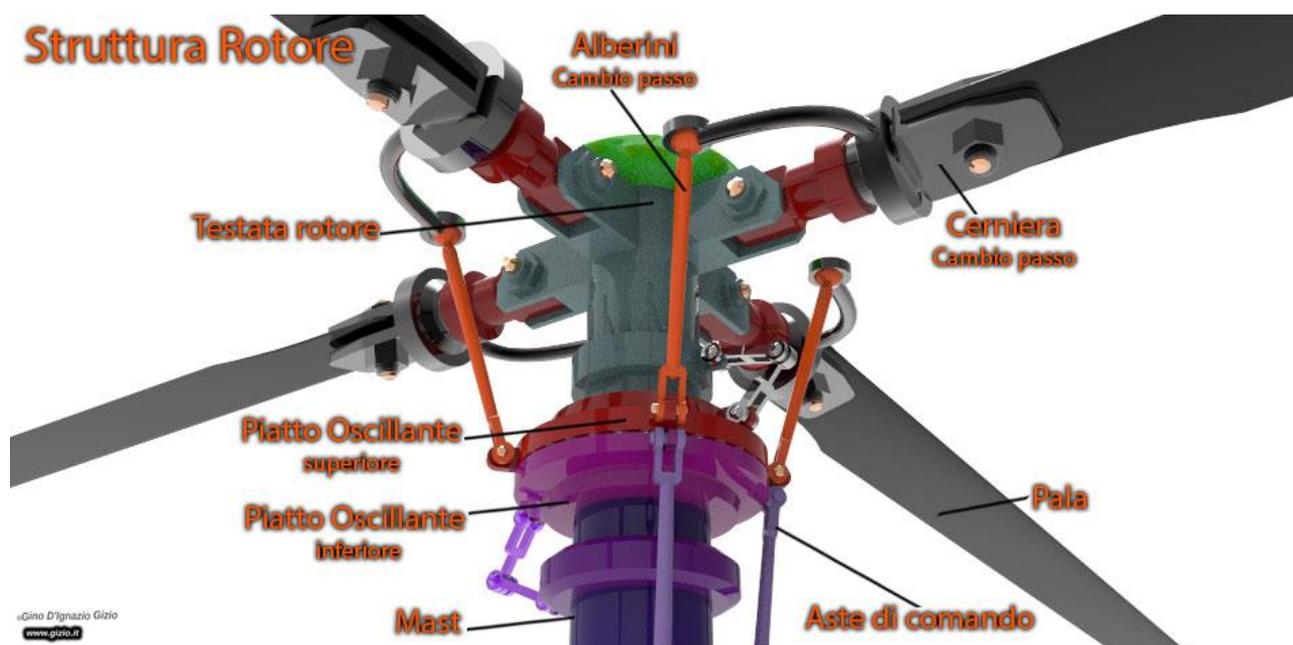


Figura 4 Struttura rotore con cerniera di cambio passo

3.2 I controlli

I controlli dell'elicottero sono: il **collettivo**, il **ciclico** e la **pedaliera**.

Il **collettivo** è uno dei controlli principali dell'elicottero, che consente di regolarne l'altitudine e la potenza. Il collettivo varia la portanza prodotta dal rotore principale, aumentando o diminuendo simultaneamente e collettivamente il passo di tutte le pale del rotore. Aumentando l'incidenza delle pale, si avrà anche l'aumento della resistenza e, quindi, della coppia resistente: conseguenza di ciò sarà una diminuzione del numero di giri RPM del rotore e del motore. E' necessario che il numero di giri RPM rimanga costante: per tale motivo è necessaria una coordinazione gas-pitch tale che la potenza aumenti quando aumentiamo il pitch delle pale e viceversa.

La **pedaliera** serve per contrastare la coppia resistente prodotta dal motore. L'elicottero, infatti, è munito del rotore di coda, il quale durante le fasi di volo va a produrre una devianza del velivolo gestita dal pilota, agendo appunto sulla pedaliera. Ad ogni incremento di potenza corrisponde una rotazione dell'elicottero, che può essere verso destra o verso sinistra, in base alla direzione della rotazione del rotore principale. La pedaliera è collegata ad un meccanismo

di cambio del passo delle pale del rotore di coda, quindi l'incidenza delle pale del rotore di coda va ad aumentare o diminuire, facendo sì che la prua del velivolo ruoti nella direzione desiderata.

Il **ciclico** controlla lateralmente e longitudinalmente l'elicottero. Agendo infatti su di esso, si va ad orientare il rotore principale in maniera tale da ottenere l'inclinazione della risultante aerodinamica necessaria per lo spostamento nella direzione e nel senso voluti. Questo è uno dei comandi più elaborati dell'elicottero, in quanto governa la variazione ciclica dell'angolo di attacco delle pale, le quali, durante la loro rotazione, non mantengono un angolo di attacco costante, ma subiscono una variazione di inclinazione che serve a distribuire in maniera opportuna la spinta, in modo da consentire variazioni di assetto e spostamento del velivolo. Prendiamo in considerazione un rotore che ruota in senso antiorario: quando il pilota sposta la leva in avanti, le biellette del piatto oscillante si alzeranno ed andranno ad incrementare il passo delle pale a sinistra; in tal modo, si incrementerà la portanza sul semidisco posteriore, scaturendo così la traslazione in avanti dell'elicottero. Ciò accade perché se si imprime una forza trasversale ad un corpo che ruota su se stesso, tale forza risponderà 90 gradi dopo rispetto al senso di rotazione stesso. Tale fenomeno fisico prende in nome di precessione giroscopica.



Figura 5 Asse verticale, longitudinale, laterale elicottero

4. DESCRIZIONE DELL'ELICOTTERO IN ESAME

Nello studio seguente si farà riferimento a SAPR destinati all'impegno in attività sperimentali e di ricerca. In particolare, si studieranno le prestazioni di un elicottero SAPR, o comunemente detto "velivolo ad ala rotante", in funzione del Payload.

L'elicottero in questione per l'attività sperimentale è un Goblin 570, concesso gentilmente da un'azienda italiana leader del settore SAB Heli Division per la suddetta attività di tesi. Tale elicottero è stato progettato esclusivamente per svolgere gare di volo 3D. Noi, invece, abbiamo cercato di valutarne le prestazioni per un uso diverso, ovvero per valutarne durata di volo e potenza assorbita ed eventualmente riprogettarlo per il corretto uso.

L'elicottero in questione è arrivato in scatola di montaggio. E' stato quindi necessario costruirlo in tutte le sue parti.



In generale è possibile suddividere le parti che costituiscono un elicottero rc nel modo seguente:

- Frame
- Batteria
- Meccanica di bordo
- Avionica
- Sistema propulsivo
- Payload

4.1 Frame

Il frame è la struttura centrale di un velivolo a pilotaggio remoto dove viene alloggiata tutta la componentistica di bordo, la meccanica e il carrello di atterraggio. Generalmente sul mercato sono presenti innumerevoli tipologie di frame che si differenziano principalmente per il materiale adottato e per la configurazione meccanica. Nel nostro caso il frame è in fibra di carbonio, materiale ultra leggero e allo stesso tempo resistente. Esso viene progettato come se fosse un cassone alare, proprio per resistere alle sollecitazioni di flessione e di torsione.

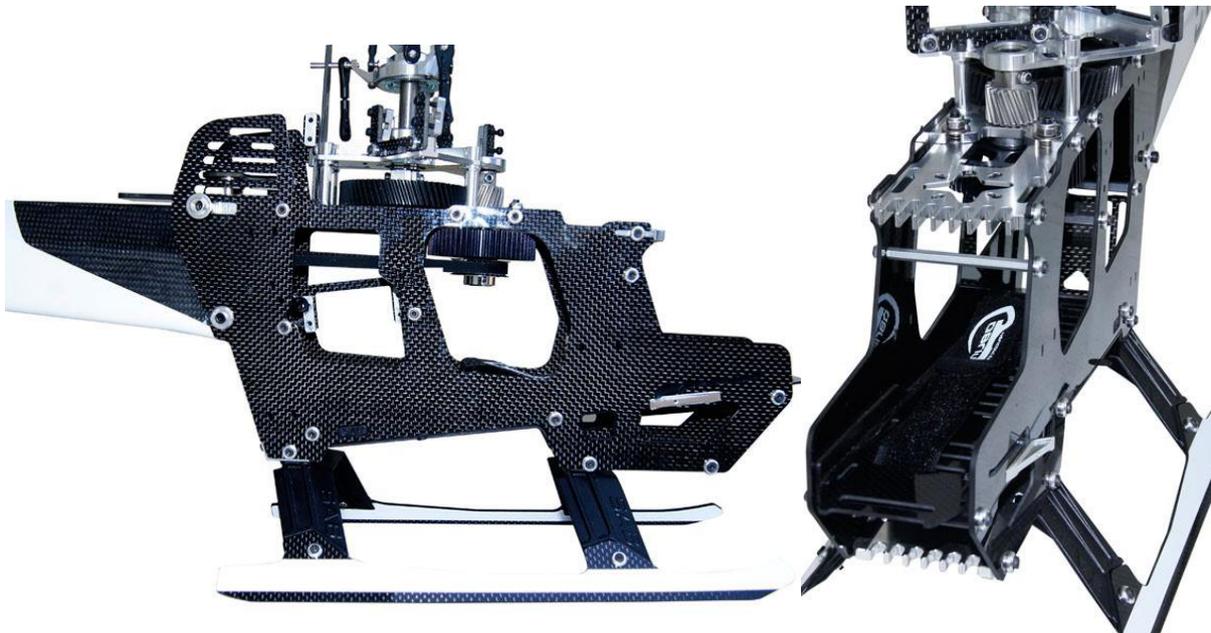


Figura 6 Frame Goblin 570

4.2 Batterie Lipo



Figura 7 Batteria Lipo 22.2 V 6s

Le batterie costituiscono l'unica fonte di energia a bordo di un velivolo a pilotaggio remoto. Il principio alla base del funzionamento è una reazione chimica di ossidoriduzione, con la quale si trasforma l'energia chimica in energia elettrica. La trasformazione è garantita dal trasferimento di elettroni da una sostanza che li cede (ossidazione) a una che li acquista (riduzione). Le sostanze che partecipano alla reazione sono chiamate "specie chimiche". La conversione energetica avviene all'interno della cella, che rappresenta quindi il

corpo centrale della batteria. A seconda delle esigenze, le celle possono essere collegate in serie se si vuole aumentare il voltaggio, o in parallelo se si vuole aumentare la capacità. Le batterie sono costituite da una o più celle collegate in serie per ottenere la tensione desiderata. La tensione massima per cella è di circa 4,25 V, invece la tensione nominale o tensione media è di 3,7 V. Il dato più importante da prendere in considerazione è il voltaggio di "cut-off", ossia la tensione minima per cella pari a 2,7 V. Per salvaguardare la vita della batteria è buona norma non scaricare mai la cella al di sotto dei 3,7 V. Nonostante i vantaggi sopra elencati, bisogna fare molta attenzione alla fase di carica e di scarica della batteria. In fase di carica è importante mantenere la tensione delle celle della batteria ben bilanciate e si può ovviare a questo problema grazie al carica batterie, che con un connettore di bilanciamento verifica ed eventualmente bilancia la tensione delle varie celle. Con il passare del tempo e con un utilizzo non ottimale del pacco batterie, si può notare un rigonfiamento della batteria, che chiaramente non è un indice di buono stato dell'accumulatore. Un'altra accortezza che bisogna avere è quella di evitare il cortocircuito, perché si rischia di avere una vera e propria esplosione.

Per caratterizzare una batteria vengono forniti dal costruttore i seguenti dati:

- Capacità [A], [mAh];
- Numero di celle;
- Tensione nominale [V];
- C-rate (corrente di scarica);

- Potenza erogabile [Wh].

4.3 Avionica

L'avionica è l'insieme degli strumenti elettronici presenti a bordo di un elicottero rc con lo scopo di garantirne la navigazione in sicurezza. I componenti utilizzati nell'elicottero in analisi sono:

- Ricevente
- Trasmittente
- Servocomandi
- Autopilota:
 - GPS
 - IMU
 - BAROMETRO
 - BUSSOLA
 - CENTRALINA

4.3.1 Ricevente

La ricevente in questione è una ricevente Futaba R6014HS da 14 canali con trasmissione dati a 2,4GHz con possibilità di alimentazione da 4,8 - 6V e con possibilità di utilizzo di servocomandi analogici o digitali.



Figura 8 Ricevente Futaba R6014 HS

4.3.2 Trasmittente

I radiocomandi vengono usati per il controllo dei modelli dinamici. I telecomandi utilizzati nel modellismo sono del tipo proporzionale e utilizzano vari sistemi per trasmettere il segnale dei vari canali. Il più diffuso è la codifica in modulazione di larghezza di impulso (PWM), con cui viene trasmesso periodicamente un treno di impulsi, un impulso per ogni canale disponibile, la cui durata dipende dalla posizione del relativo stick di controllo. La durata degli impulsi è standardizzata in maniera da permettere l'utilizzo di attuatori di marche diverse, e può variare da 920 a 2120 μ s. La durata di 1520 μ s corrisponde alla posizione di "neutro". Questo segnale inviato ad un apposito servocomando verrà trasformato in un movimento meccanico.

Fra apparecchiature di alto livello si è diffuso negli ultimi anni l'uso di un sistema di trasmissione digitale. La posizione degli stick di controllo viene dapprima convertita in digitale e in seguito trasmessa al modello come flusso di dati. Il vantaggio di tale tecnologia è la possibilità di effettuare un controllo di validità dei dati ricevuti e, nel caso la trasmissione non sia valida, agire secondo impostazioni preselezionate bloccando i servocomandi o impostandoli in una posizione predefinita.



Figura 9 Trasmittente Futaba

4.3.3 Servocomandi

I servocomandi, o più semplicemente servo, vengono utilizzati nell'ambito del modellismo e della robotica. Si tratta di piccoli dispositivi, generalmente contenuti in uno scatolotto di materiale plastico o metallico e muniti di un motorino, una serie di ingranaggi di riduzione e circuiteria.

Dal corpo di un servocomando fuoriesce un perno di rotazione, al quale possono essere fissate mediante un incastro zigrinato e una vite centrale le cosiddette "squadrette", di varie forme, materiali e dimensioni e che servono per collegare il servocomando al dispositivo che esso dovrà "muovere". Generalmente le squadrette sono forate, in modo da permettere l'ancoraggio tramite viti autofilettanti, di staffe oppure per permetterci di inserire al loro interno gli alberini di comando.

I servocomandi, a dispetto delle loro ridotte dimensioni, grazie a sistemi di riduzione ad ingranaggi più o meno sofisticati, hanno incredibili forze torcenti e sono in grado di spostare diversi Kg.

Un'altra peculiarità è quella di mantenere la posizione: se si invia il segnale al servocomando di ruotare di un certo numero di gradi, se tale comando viene inviato di continuo, la squadretta del servocomando rimarrà in quella posizione trattenendo il carico a cui è collegata. Ovviamente bisogna sempre scegliere un servocomando che abbia la potenza necessaria a svolgere il compito assegnatogli.

Alcuni servocomandi possono essere alimentati con DC 6.0V-8.4V. Le velocità di risposta variano a seconda della tipologia dei servi e dell'alimentazione. I servi più veloci hanno velocità di risposta di 0.06 secondi /60 gradi.



Figura 10 Servo Goblin 570

4.3.4 Autopilot WooKong Ace One

L'autopilota è un sistema di controllo compatto per elicotteri rc per il volo normale e per l'acrobazia 3D. Possiede un software avanzato in cui è integrata un'unità inerziale a tre assi, giroscopio, accelerometro e altimetro barometrico.



Figura 11 In successione: GPS, Centralina, controllo inerziale + giroscopio

L'Autopilota può essere utilizzato in quattro modalità di volo:

- **In modalità manuale "Manual Mode"**, in cui il pilota controlla l'elicottero manualmente su tutti gli assi (così come l'elicottero classico); questa modalità è adatta per lo sport e per il volo acrobatico classico e 3D, compresa l'autorotazione. Dopo aver portato l'elicottero ad una quota di sicurezza, è possibile passare alla modalità di volo con stabilizzazione automatica.
- **Nella modalità di stabilizzazione "Atti Mode"** la centralina stabilizza automaticamente la posizione dell'elicottero su tutti i suoi assi, ma non mantiene la posizione.
- **In stabilizzazione modalità GPS "GPS Atti Mode"**, la centralina stabilizza automaticamente l'elicottero su tutti i suoi assi e in più mantiene la posizione geografica grazie al controllo GPS.
- **In modalità "GPS Cruise Mode"**, oltre ad avere una stabilizzazione su tutti i suoi assi e posizione geografica, è in grado di controllare la velocità del velivolo prefissata precedentemente.

Nell'eventualità di perdita di segnale, la centralina entra in modalità "fail-safe" in cui l'elicottero rimane in hovering ad una quota prefissata finché non vi è ritorno di segnale.

L'unità di controllo è collegata ad un LED esterno con il modello ad alta luminosità per indicare lo stato di funzionamento



Figura 12 Led esterno indicante lo stato di funzionamento del sistema

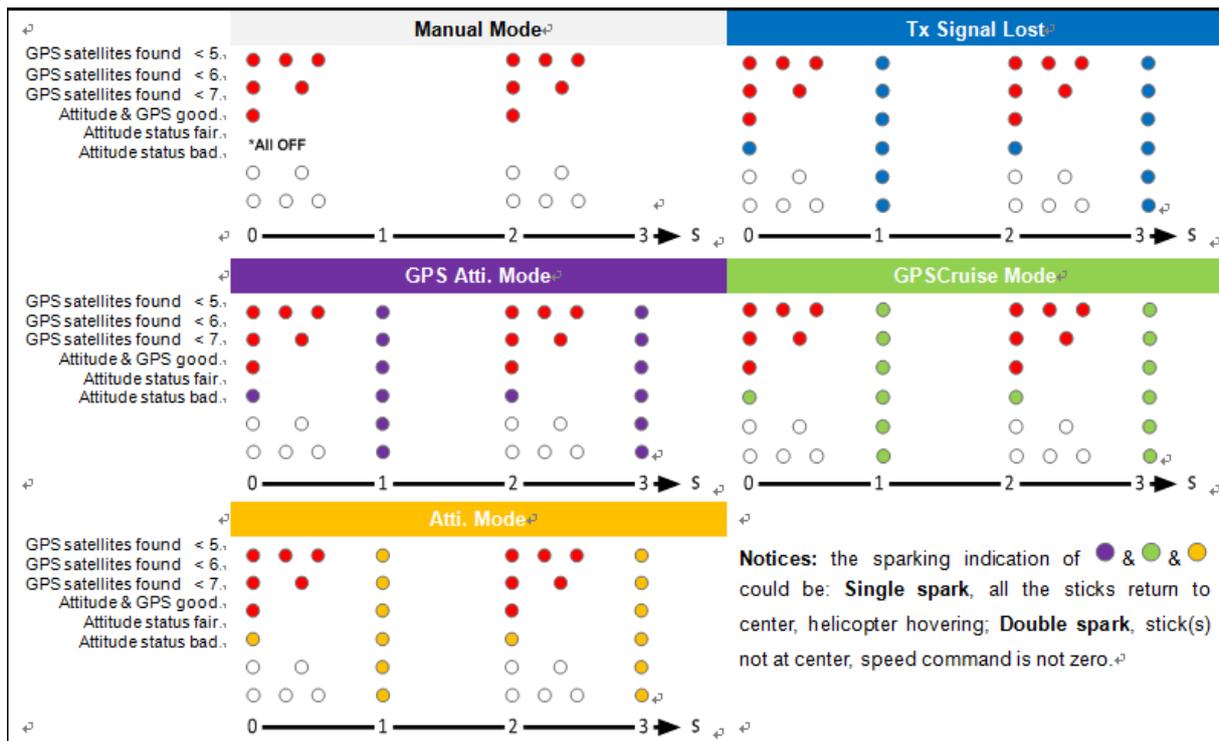


Figura 13 Ace One Autopilot Flight Testing

L'autopilota è programmabile attraverso computer grazie ad un apposito programma. Esso si compone di varie schermate in cui inserire valori di gain e altri parametri per regolare al meglio il volo dell'elicottero nelle varie modalità di volo.

Per arrivare a tali parametri sono stati inseriti prima valori medi compresi tra i minimi e i massimi disponibili e sono stati effettuati dei voli per controllare la risposta dell'elicottero. In base alla risposta e alle sensazioni del pilota, sono stati successivamente modificati di poco, continuando a testare l'elicottero in fase di volo fino a raggiungere l'ottimizzazione completa dell'autopilota.

Di seguito riportiamo degli screenshot delle varie schermate:

Assistant Software - MOUNTING page

MOUNTING WIZARD STEP 1/8

IMU Orientation STEP1

Forward Backward Left Right

Mounting Location STEP2

IMU

X

Y

Z

GPS

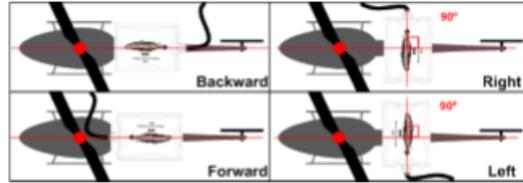
X

Y

Z

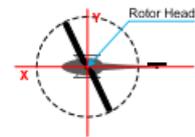
Not showed in WKH Life

STEP1: Select IMU Mounting orientation



STEP2: Fill in the distance between IMU/GPS and the C.G. of helicopter in X, Y & Z axes, please measure the C.G. with following method:

- a) Adjust your helicopter, and make it balance on X and Y axle as shown below.

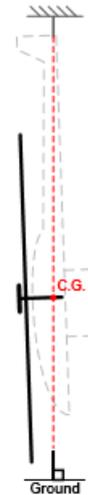


Balance on X Y

- b) The C.G. should be on the extended line of helicopter main shaft.



- c) Hang the helicopter by the tail and use a plum line to find C.G. on Z axle. You can use your own methods to estimate the C.G. of your helicopter.



Note: measurement in CM

*Step c) is not required to pod/boom, and scale helicopter. Simply enter value zero will be sufficient.

GPS normally mounted on tail boom, thus X and Z could be zero, distance between GPS to main shaft is X.

Figura 14 Introduzione alla programmazione dell'autopilota

SCHERMATA 1

Nella prima schermata vengono inserite indicazioni circa la posizione in x,y,z dell'unità inerziale e del GPS in cm rispetto all'albero principale dove è collocato il rotore principale.

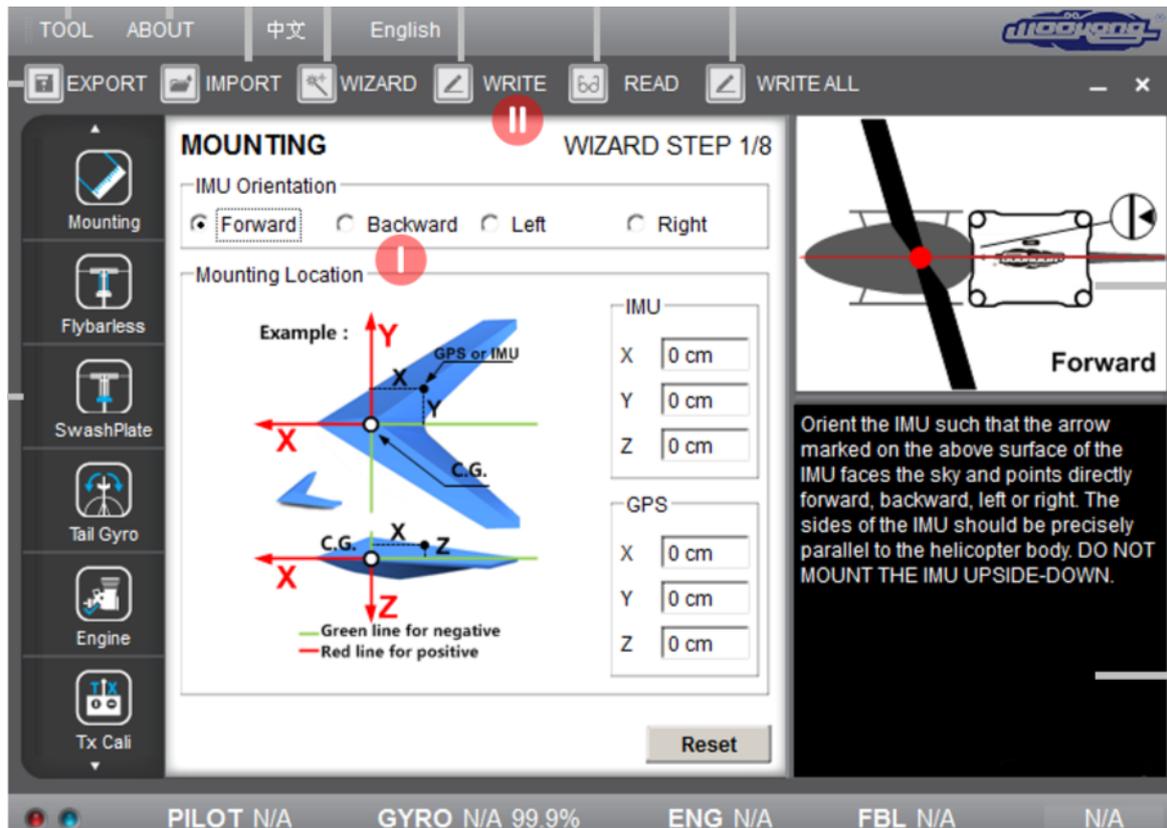


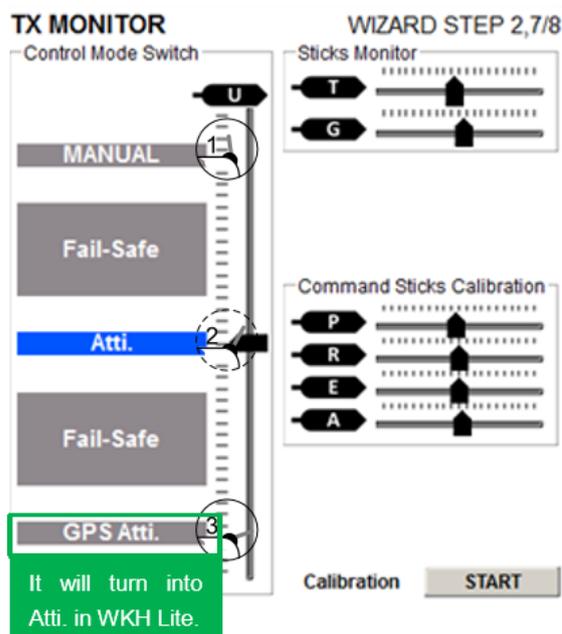
Figura 15 Prima schermata Autopilota

SCHERMATA 2

Nella seconda schermata viene assegnata agli interruttori della trasmittente la posizione corrispondente alle modalità di volo precedentemente descritte: *Manual Mode*, *Atti Mode* e *GPS Atti Mode*. Per semplicità di esecuzione delle varie modalità durante il volo, si è optato per un interruttore a tre vie che potesse ricevere tutte e tre le medesime modalità.



In Assistant Software, page TX-MONITOR:



Once the switch position has been matched to specific control mode, you will see the high-light as shown following.



Whichever 2 or 3 positions switch/channel user has

selected or decided to use in the transmitter (for control mode switching), in this case channel U marking on main controller. Use sub-trim or end-point (+/-) fine tuning on your transmitter, move the slider of channel U to the specific range until Assistant Software indicates that it is in **Manual**, **GPS Atti.**, **Atti.** and **Failed-Safe mode**.

Notice: To move the slider is to adjust sub-trim or end-points of the channel selected.



For 3-positions switch, you should assign:

Position-2 to Atti. Mode;

Position-1 to Manual Mode;

Position-3 to GPS Atti. Mode;

Or reverse the assignment for **Position-1** and **Position-3**.

For 2-positions switch, you should assign:

Position-1 to Manual Mode;

Position-3 to GPS Atti. Mode;

Or reverse the assignment for **Position-1** and **Position-3**.

Notice: Please see page 3 for introduction of autopilot control modes.

Figura 16 Seconda schermata Autopilota

Infine, si ricorre a calibrare il sistema posizionando l'interruttore in una delle modalità, e successivamente muovendo in tutte le direzioni, sino a fine corsa, gli stick della trasmittente. Si ripete tale procedura per ognuna delle modalità di volo.

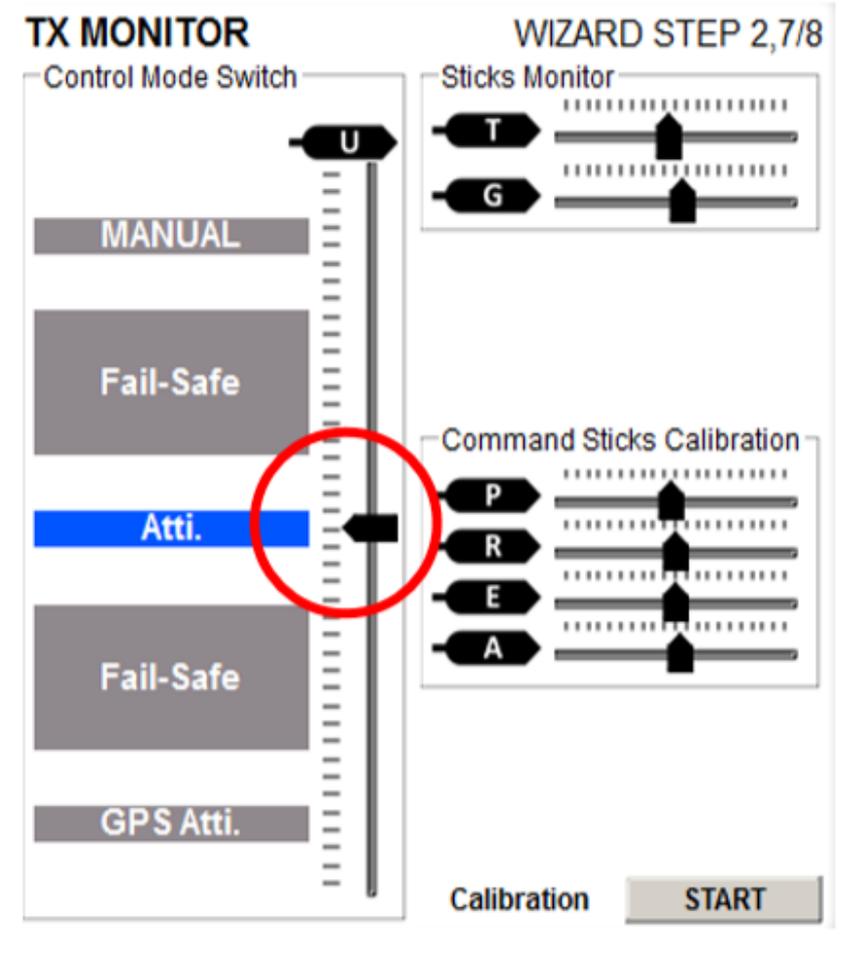


Figura 17 Schermata calibrazione trasmittente

SCHERMATA 3

Viene fatto sapere all'autopilota se il nostro elicottero è un flybarless oppure no, e successivamente bisogna inserire vari parametri per regolare la sensibilità, velocità di risposta degli stick, velocità di risposta dello swashplate e il peso del flybar; (Maggiore è il valore, migliore è la stabilità statica dell'elicottero. ma, aumenta la lentezza del tuo feeling di controllo .



Assistant Software, page-FLYBARLESS:

FLYBARLESS **WIZARD STEP 4/8**

STEP1

Flybarless

↶ ON ↷ OFF

STEP2

Parameter

| | AILE | ELEV |
|---------------|---------|---------|
| Gain | 0% | 0% |
| Direct Input | 0% | 0% |
| Cyclic Rate | 0 deg/s | 0 deg/s |
| Flybar Weight | 0% | 0% |

STEP1: Choose flybarless ON/OFF, you **MUST NOT** enable flybarless function for helicopter with flybar, otherwise the helicopter will be out of control.

When Flybarless is turned on, elevator & aileron will have stabilization in manual mode.

STEP2: During test flight procedure, please perform the following configuration procedure.

Gain *Parameter range: 20% to 500%*
If the helicopter is sluggish, increase it; if the helicopter oscillate back after brake, decrease it. Adjust this parameter 10% increment time until your control feeling is sharp and the helicopter would not bounce after braking.

Note: this parameter will only affect the stability but not control feeling.

Direct Input *Parameter range: 30% to 300%*
This is the direct connect ratio for command stick effect, the rolling speed might not be uniform if it is too high, and also will lead to quick or sudden change in cyclic response.

Cyclic Rate *Parameter range: 20 deg/s to 450deg/s*
This is the helicopter body rolling speed ratio, which determines the maximum rolling speed corresponding to command stick end point. The helicopter would response very quickly if it is too high, for example high rate in 3D.

Flybar Weight *Parameter range: 20% to 300%*
The higher the value, the better the static stability of the helicopter. But, it will increases the sluggish on your control feeling, such as bank turn, and braking is also not sharp enough, like an large inertia helicopter. Similar to adding weight to blade tip.

Figura 18 Schermata 3 Autopilota



Figura 19 Elicottero con rotore Flybar



Figura 20 Elicottero con rotore flybarless

SCHERMATA 4

In questa schermata è inserita la tipologia dello swashplate e vengono regolati tutti i servi inerenti al passo, alettoni ed elevatore, in modo da avere movimenti concordi in base alla posizione degli stick della trasmittente, a loro volta concordi al reale movimento dell'elicottero. Si ha inoltre la possibilità di limitare in percentuale l'escursione dell'elevatore, alettoni e passo in base all'impiego che se ne dovrà fare o in base alle richieste del pilota.



 If you have enabled Flybarless function, then Swash Mix ratio settings for AILE (Cyclic Roll) and ELEV (Cyclic Pitch) will not be available, please read Flybarless setting for detail.



Swash Mix is identical to Tx CCPM mixing, this function is no longer available on Tx after set to single servo (on Tx).

 **STEP1:** You have to set the transmitter to **single servo swash** (Futaba:H-1;JR/Spektrum:1sNORM;Hitec:1-Servo 90), and WKH will do the CCPM instead.

STEP2: Please make your selection according to your swashplate type.**IMPORTANT**

STEP3: The swashplate can be rotated in 360° with 1°step increase or decrease. Not required in most conditions.

STEP4: Click  /  button, you can reverse the working *Direction* of swashplate servos. Servo *Trim* is in range -100 to +100, with default value at 0. The swashplate must be level. The *Current Output* will indicate whether your swashplate servos are on their center position or not.

 Please read your helicopter's manual, and make sure the swashplate servo linkage and all the mechanical parts were correctly adjusted before you use the above function for swashplate level adjusting.

STEP5: Click  /  button, you can reverse the moving direction for PITCH (Collective Pitch), AILE (Cyclic Roll) and ELEV (Cyclic Pitch). The **Swash Mix** ratio is 0~100%, which defines the maximum working range for PITCH (Collective Pitch), AILE (Cyclic Roll) and ELEV (Cyclic Pitch), similar to Tx setting. **Suggestion:** 35~45%, it can give you soft flying movement, and easy to configure for the following parameters.

Figura 21 Schermata 4 Autopilot

L'autopilota funziona meglio a giri costanti. Per questo motivo si modificano le curve del pitch e throttle in base alla richiesta dell'autopilota secondo il seguente schema:

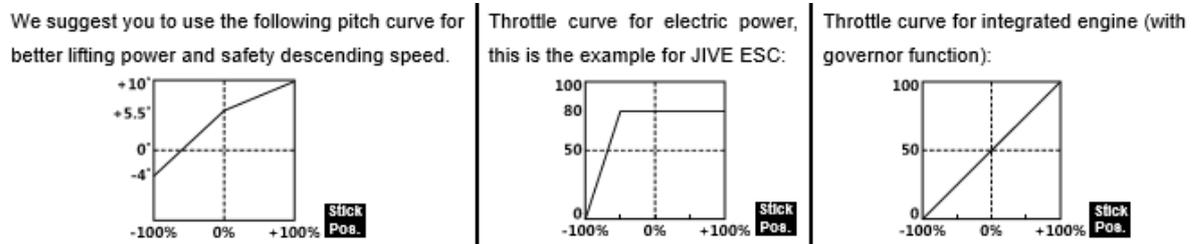


Figura 22 Schermata 4 Autopilot Configurazione pitch e throttle

SCHERMATA 5

In questa schermata si analizzano e modificano i parametri relativi al rotore di coda. Innanzitutto, si sceglie la direzione corretta del movimento delle pale per contrastare correttamente la coppia scaturita dal rotore principale.

Successivamente, si indica la tipologia di servo utilizzato per il rotore di coda, nello specifico velocità di risposta e Hz del suddetto servo.

Infine, si può regolare il fine corsa per fare in modo che il comando del rotore di coda che scorre sull'alberino di coda non vada a toccare la struttura dell'elicottero.

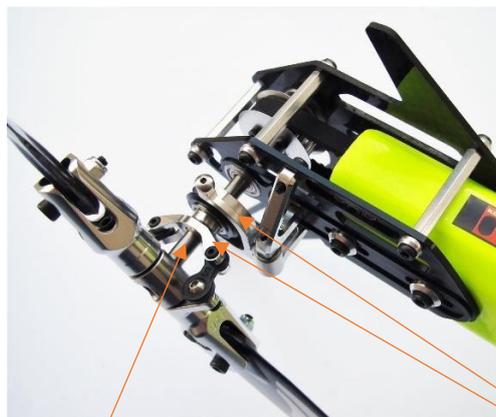


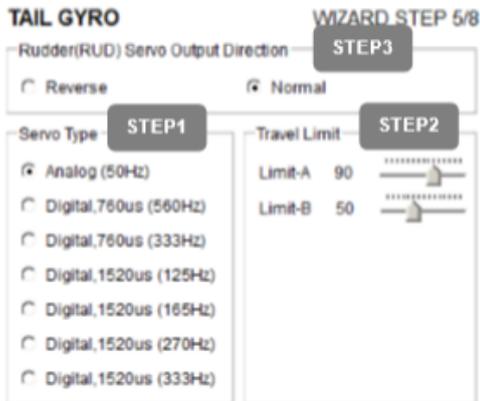
Figura 23 Comando rotore coda Goblin 570

Alberino di coda

Comando del rotore di coda che scorre sull'alberino

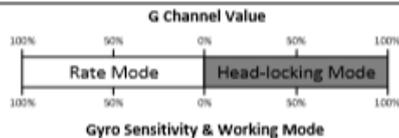


Assistant Software, page-Tail Gyro:



Transmitter related channels

| Input | Operation | Description |
|----------|-----------|--|
| R | Stick | Rudder command |
| G | Switch | 1. Gyro working mode selection: Rate Mode/Head-Locking Mode 2. Gyro sensitivity setting 3. Quickly slide it from rate mode to head-locking mode for 3 times, the command stick center position would be reset. |



STEP1: Please properly set your rudder servo type before you connect your tail-gyro servo to it, otherwise your servo might be damaged due to incorrect servo type chosen.

Analog Servo(1520us @ Receiver Speed)

Digital Servo(1520us165, 270, 333Hz),

Suggested servo type: *JRDS8925HV* ; *Futaba S9254*

Digital Servo(Digital-760us333,560Hz),

Suggested servo type: *Futaba* BLS251 / BLS351.

STEP2: We have [Limit A] and [Limit B](Range:-140 to +140), which represent end-points of the tail rotor pitch. The initial value for both is 50. Adjust these two limit value, make sure your rudder servo can work the full range for your tail rotor pitch, without any mechanical binding. Otherwise, the performance of the tail-gyro will be affected. You can identify which side of the tail rotor pitch is represented by Limit A / Limit B like this:

1. Set one of them to 0, another to 50.
2. Move your rudder stick on your transmitter.
3. One side of the tail rotor pitch will not move.
4. This side should be related to the Limit A / Limit B whichever you are giving value 0 to.

STEP3: Move your rudder stick, and check whether the tail rotor pitch is working to your expected direction. If not, please change to proper direction.



You must also finish the **SYSTEM CHECK** procedure in later steps, before you fly your helicopter. You might find the **Controller Output Check** for tail rudder result in opposite rudder moving directions, click **[Reverse]** button to make corrections. Please see *Page 增読本 定义书第...*

Figura 24 Schermata 5 Autopilot

SCHERMATA 6

Ora ci si concentra sul motore. Innanzitutto, si indica la tipologia di motore utilizzato, che può essere nitro o elettrico; nel nostro caso, un motore elettrico. Successivamente, si settano le tre posizioni del throttle Max Idle e stop.

Il Max corrisponde alla posizione dello stick portato tutto in su; lo Stop corrisponde al valore dello stick portato tutto in giù. Idle invece corrisponde all'incirca alla posizione dello stick che dà l'hovering. Si effettua un test, che in caso di esito positivo si colorerà di verde; se invece avrà un esito negativo si colorerà di rosso.

Ulteriori parametri quali Magnetic speed sensor e rotor/engine speed sono suggeriti dall'azienda costruttrice dell'autopilota e si possono trovare nella figura seguente.

B7 Engine Governor

In Assistant Software, page-ENGINE:

ENGINE WIZARD STEP 6/8

Working Mode

Tx Control For Electric Motor Governor control For Gas/Nitro Engine

Throttle Servo Working Range

TEST TEST TEST STEP3

SET-MAX SET-IDEL SET-STOP STEP4

Magnetic Speed Sens STEP5 Gov Gain STEP7

0% 50%

Rotor/Engine Speed

Rotor RPM Gear Ratio Engine RPM

800 X 10.0 = 6000

STEP1: Before using Governor Control mode, fine tune your Gas/Nitro engine to good condition. Otherwise the performance would be negatively impacted.

STEP2: Select the operation mode:

- Select [TX Control] for electric motor;
- For Gas/Nitro engine, select [TX Control] first, and finish next step: set throttle servo working range. Then select [Governor Control].

STEP3: SET throttle servo travel range, move the throttle stick to

| For Electric | For Gas/Nitro | Click to set |
|-----------------------|------------------------|--------------|
| Maximum open position | | [SET-MAX] |
| lowest stick throttle | Engine idling position | [SET-IDLE] |
| Throttle hold | Cut position | [SET-STOP] |

Notice: you must not turn on the throttle-cut.

STEP4: After three of the throttle positions being set, click [TEST] button above to review your throttle working range settings. Throttle servo will be forced to stay on each respective position for about 2 seconds. Repeat the [SET] procedure if it is not set incorrectly.

Warning: If a mistake is made, e.g. STOP position being set between MAX and IDEL, you will be notified by **X** (Wrong), and Engine governor will be forced to work in [Tx Control] mode automatically.

STEP5: A third party engine speed sensor is required for the engine speed governor to function. We suggest using Futaba magnetic engine speed sensor. You have to adjust the sensor/magnet mounting, and leave a proper space between the sensor head and magnet. You can check this with the percentage bar at page "ENGINE", over 60% means the magnet is directly facing the sensor, and less than 2% means that the sensor is far from directly pointing at the magnet.

Notice: Only ONE magnet can be mounted on cooling fans of the engine.

STEP6: Please refer to user manual of your helicopter and engine, find the following parameters:

- Main rotor speed, in range: 800 to 2500 RPM;
- main gear ratio, in range: 1.0 to 20.0;
- Engine RPM, in range: 6000 to 25000 RPM. (Will be calculated automatically)

STEP7: Gov Gain setting, range: 50% to 300%;

Suggestion: 50% for Nitro engine; 150% for gasoline engine;

Figura 25 Schermata 6 Autopilot

SCHERMATA 7

In questa schermata si effettua di nuovo la calibrazione nelle varie modalità di volo, muovendo gli stick sino a fine corsa in tutte le direzioni. Viene effettuata la calibrazione di alettoni, elevatore, pitch e rotore di coda.

B8 R/C Transmitter Calibration

 In Assistant Software, page-TX MONITOR:

TX MONITOR **WIZARD STEP 2,7/8**

Control Mode Switch: U

MANUAL

Fail-Safe

Att. (highlighted)

Fail-Safe

GPS Atti.

Sticks Monitor

T

G

Command Sticks Calibration

P

R

E

A

Calibration **START**

 Totally 4 TX channels are required to be calibrate:

STEP1. Click **[START]** button, and move all of the sticks throughout their complete range several times.



STEP2. Click **[FINISH]** button when you finished above procedures.

 1 You have to finish the throttle and pitch curve setting before calibration, here the end-point of transmitter sticks will be record.
2 If the throttle or pitch end-point of transmitter had been changed, please calibrate it again.

Figura 26 Schermata 7 Autopilot

SCHERMATA 8

Questo step è molto importante, in quanto viene effettuato un Controller Output Check di tutti i movimenti dell'elicottero. Basta premere Start e comincia il test, durante il quale bisogna controllare che i meccanismi di swashplate e coda siano quelli che ci aspettiamo.

Viene effettuato anche un test della batteria. Se il test avrà esito positivo, comparirà un pallino di colore verde.

● **Controller Output Check**

- 1 Switch to **Non-Manual mode** first.
- 2 Click [START] button, WKH will drive the **swashplate** going up and down, representing collective movement during flight.
- 3 Click [NEXT] button, WKH will drive the **swashplate** going forward and back, representing elevator movement during flight.
- 4 Click [NEXT] button, WKH will drive the **swashplate** going left and right, representing aileron movement during flight.



- 5 Click [NEXT] button, WKH will drive the **rudder**, representing rotating C.C.W. and then C.W.



- 6 Click [END] button or switch to **Manual mode**, Controller Output Check will be finished.

 If the swashplate or rudder moves in opposite sequence, you should click reverse button  for correction.
If the swashplate or rudder still doesn't moves as your expected, it may cause by wrong connection between WKH main controller and R/C Receiver, please also check the swashplate setting and Tail-Gyro setting.

● **IMU Feedback Check**

- 1 Switch to **Atti. or GPS Atti.Mode** first.
- 2 Click [CHECK] button.
- 3 Tilt the tail boom of the helicopter, the swashplate should respond to the opposite direction.
- 4 Tilt the helicopter body on its roll direction, the swashplate should also respond to the opposite direction.
- 5 Switch to **Manual mode** and finish the IMU Feedback Check.

 1 If your helicopter was not responding as described above, you may be placing your IMU in a wrong orientation, or you've select a wrong orientation for your IMU in Assistant Software. Please check sensor mounting again.
2 If the swash is not level (This is not critical), this can because by:
■ IMU is not level to AIR frame;
■ AIR frame and landing skids are not level to ground.

Battery Performance Test

- 1  Switch to **Non-Manual mode** first.
- 2 Make sure that your battery has at least 80% capacity left from being fully charged.

- 1 Click [START] button, WKH will force all the servos you connected and LEDs working at maximum payload, which will behave as shaking swashplate and rudder. This will continue for 20 seconds and then stop automatically, you can force it stop by clicking [STOP] button, or switch to **Manual mode**.

- 2 Assistant Software will inform you the test result (LED will also blinking in yellow if you have it and failed condition was matched):

 Failed, it means voltage drop below 3.5v, the battery or BEC were not be able to provide necessary power, please change it. 

Test passed.

Figura 27 Schermata 8 Autopilot

SCHERMATA 9

Vengono impostati parametri relativi all'autopilota. Nel nostro caso sono stati presi parametri indicati dall'azienda per il T Rex 600 Elettrico.

B10 Autopilot



In Assistant Software, page-Autopilot:

AUTOPILOT

Basic Parameters

| | Front/Back | Left/Right | Vertical |
|-------------|------------|------------|----------|
| Gain | 0% | 0% | 0% |
| Agility | 0% | | |
| Stick Delay | 0% | | |

Advance Parameters

| | Front/Back | Left/Right | Vertical |
|-------------------|------------|------------|----------|
| Velocity Tracking | | | 0.0% |
| I | 0% | 0% | 0% |

No these two items in WKH Lite

DEFAULT



Transmitter related channels

| Input | Operation | Description |
|-------|-----------|--|
| U | Switch | Control Mode Switch |
| G | Switch | Quickly slide it from rate mode to head-locking mode for 3 times, all the command sticks center position would be reset, see page 15 for tail gyro working mode setting. |
| P | Stick | Up/Down command from Tx |
| E | Stick | Front/Back command from Tx |
| A | Stick | Left/Right command from Tx |
| R | Stick | Rudder command from Tx |

Base Parameters

• Gain

Range: Front/back & Left/Right 40% ~ 400%; Vertical 50%~250%

If too large, you will find the helicopter oscillating in the corresponding direction (About 5~10 times per seconds). If too small, the helicopter will likely to be hard to control.

(**Lite** WKH Lite user can skip this section) In *GPS Atti*.

Mode, if helicopter drifting on front/back or left/right direction for 2~5 meters, then increase 10% on the corresponding direction it drifts to until the helicopter getting oscillation. If helicopter vibrate on its vertical direction, then reduce vertical parameter by 10% until it get stable. If altitude drop and drift happens during sharp braking, then increase I.D.R-Vertical in advance parameters.

• Agility *Range: 50% ~ 200%*

It determines the start-up speed from command stick, the bigger the value the faster the reaction. Increase it for sharper and quicker leveling action after command stick released. The control feeling will be stiffness and rigid if the value is too high; and sluggish leveling action and slow braking if too small.

• Stick Delay *Range: 50% ~ 200%*

It determines the overall stick reaction speed, for example: You push your roll stick to the maximum position your helicopter will tilt from leveling to 45 degrees, the smaller the number the quicker the transition.

Advance Parameters

The default values are suitable for most of the condition. DJI specialized guidance is needed if change is necessary.

• Velocity Tracking: *Range: Vertical 20.0% ~ 150.0%*

• I: *Range: Front/Back & Left/Right & Vertical 0% ~ 500%*

Lite WKH Lite does not have I of Front/Back & Left/Right.

Figura 28 Schermata 9 Autopilot

Suggested Parameters

| | ALIGN600 Nitro | | | ALIGN 600Elec. | | | LOGO 700 | | | Maxi Joker 3DD | | | JR GSR260 | | |
|--------------------------|----------------|-----|-----|----------------|-----|-----|----------|-----|-----|----------------|-----|-----|-----------|-----|-----|
| | F/B | L/R | V | F/B | L/R | V | F/B | L/R | V | F/B | L/R | V | F/B | L/R | V |
| Gain | 100 | 100 | 100 | 130 | 110 | 80 | 150 | 151 | 100 | 160 | 160 | 110 | 155 | 165 | 130 |
| Agility | | 100 | | | 150 | | | 130 | | | 100 | | | 175 | |
| Stick Delay | | 100 | | | 110 | | | 135 | | | 185 | | | 166 | |
| Velocity Tracking | | | 100 | | | 113 | | | 100 | | | 100 | | | 100 |
| I | 100 | 100 | 100 | 114 | 115 | 116 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Figura 29 Parametri suggeriti per impostazione Autopilot

4.3.5 GPS

Sull'elicottero è presente un magnetometro con antenna GPS in grado di ricevere il segnale satellitare, e tramite opportuni algoritmi elabora un'informazione accurata su posizione e velocità che viene inviata all'autopilota. Il GPS è un sistema di posizionamento e navigazione satellitare civile che, attraverso una rete dedicata di satelliti artificiali in orbita, fornisce ad un terminale mobile o ricevitore GPS informazioni sulle sue coordinate geografiche in ogni condizione meteorologica, ovunque sulla Terra o nelle sue immediate vicinanze ove vi sia un contatto privo di ostacoli con almeno quattro satelliti del sistema. La localizzazione avviene tramite la trasmissione di un segnale radio da parte di ciascun satellite e l'elaborazione dei segnali ricevuti viene effettuata dal ricevitore. Il suo grado attuale di accuratezza è dell'ordine dei metri, in dipendenza dalle condizioni meteorologiche, dalla disponibilità e dalla posizione dei satelliti rispetto al ricevitore, dalla qualità e dal tipo di ricevitore utilizzato.



Figura 30 Ricevitore GPS

4.4 Sistema propulsivo

Il sistema propulsivo si compone di ESC, motore brushless ed elica.

4.4.1 ESC

L' Electronic Speed Control o semplicemente ESC è un regolatore elettronico fondamentale per consentire il volo di un elicottero. In particolare si occupa di gestire la velocità di rotazione del motore elettrico. Tale controllo agisce regolando il flusso di corrente da inviare al motore brushless. L'ESC comunica con l'autopilota mediante un segnale PWM (Pulse Width Modulation), ovvero una modulazione digitale a larghezza d'impulso. Il Flight Control è collegato con una ricevente, quindi, in base ai comandi ricevuti dall'operatore, invia un'informazione codificata sotto forma di durata nel tempo dell'impulso.

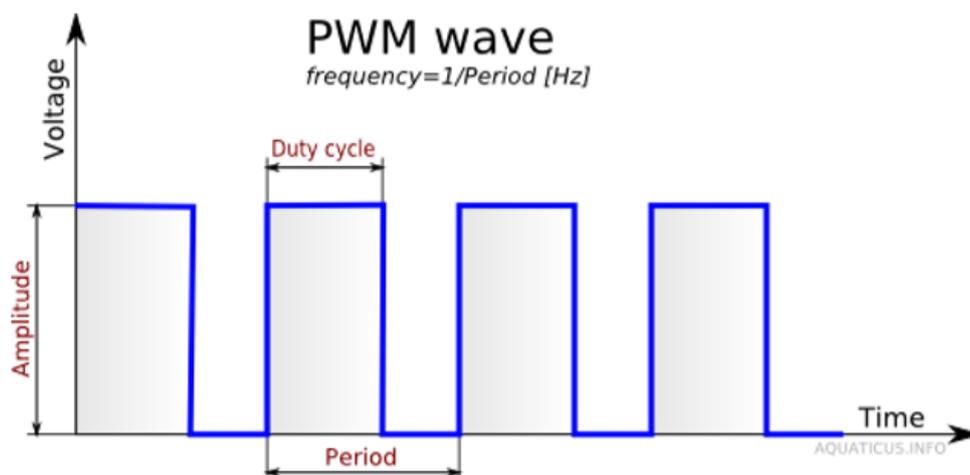


Figura 31 Esempio di modulazione digitale PWM (Pulse Width Modulation).

La lettura dell'informazione da parte dell'ESC avviene riconoscendo la durata temporale del segnale "alto". Ogni ESC ha una limitazione sulla massima corrente e tensione che esso può gestire. Un sovraccarico di corrente porta ad un surriscaldamento del componente, che può anche portare ad una rottura. La tensione applicata è quella dell'alimentatore. Nella scelta dell'Electronic Speed Control si deve conoscere il picco di corrente assorbita dal motore e la tensione erogata dalla batteria.



Figura 32 ESC con corrente massima da 100 A utilizzata per il Goblin 570

Caratteristiche Tecniche:

Corrente continua: **100A**

Burst corrente: **150A (10 sec)**

Modalità BEC: **Switch Mode BEC, 6.0V / 7.4V / 8.4V; Cont .: 10A, Burst: 25A, BEC ha la protezione cut-through (il che significa che la tensione della batteria non sarà possibile ottenere attraverso il ricevitore se il BEC viene accidentalmente danneggiato)**

Programmabile: **Sì**

Cellula di batteria: Li-PO: **2 ~ 6 celle (5.2V ~ 25.2V)**

Input / Output Cavo: **Entrambi 12AWG**

Peso: **110g (con ventola)**

4.4.1.1 BEC

Questa tecnologia permette, tramite un circuito, il recupero di energia per alimentare la ricevente e i servocomandi, laddove presenti. In passato era necessario avere un alimentatore a parte, mentre attualmente il sistema BEC consente di avere una sola batteria, con il vantaggio di limitare il peso e l'ingombro. Si deve considerare che la tensione di alimentazione della

ricevente, pari a 5 V, è molto minore rispetto alla tensione proveniente dalla batteria, quindi il BEC deve “eliminare” la tensione in eccesso. Naturalmente l’energia non può essere eliminata, quindi si trasforma in calore dissipato. Questa tipologia di ESC è programmabile, in particolare si possono settare dei parametri in grado di controllare a piacere dell’utente l’erogazione di potenza. Di seguito si vede un esempio di circuito con ESC e BEC integrato:

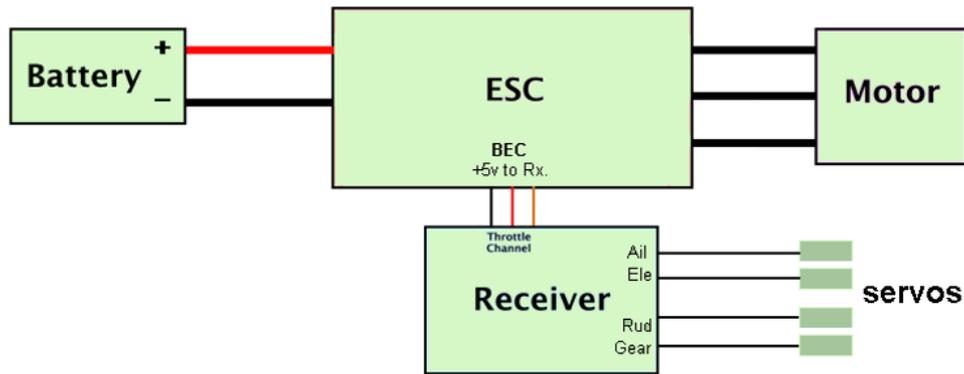


Figura 33 Schema tipico di collegamento Batteria ESC Motore Ricevente e Servocomandi

4.4.2 Motore brushless

Il motore fornisce la coppia propulsiva da erogare all’elicottero. Nel nostro caso si è utilizzato un motore brushless, cioè ‘senza spazzole’. Esso è costituito da un rotore a magneti permanenti e da uno statore costituito da avvolgimenti elettrici detti “spire”.



Figura 34 Statore motore brushless XNOVA 4025

Il funzionamento è semplice: la corrente continua viene fatta scorrere all’interno delle spire per generare un campo magnetico rotante. La cassa rotante esterna segue il campo magnetico generato dallo statore interno; per questo motivo vengono detti “motori sincroni”. Le perdite dovute all’attrito sono talmente basse che l’efficienza di questi sistemi può arrivare a 0.9.

Di seguito un’immagine del motore brushless utilizzato sul Goblin 570:



XNOVA
PERFORMANCE MOTORS

| | |
|--------------------------------------|--|
| Slots & Poles | 24n8p |
| Winding T | 1.5Y |
| rpm/V | 1120 |
| Volt (V) | 10 20 25 |
| Io(A) | 2.7 3.2 3.6 |
| Rm (mohm) | 7.3 7.3 7.3 |
| Weight (without connector) (g) | 384 |
| Body Length (no shaft) mm | 55.75 |
| Diameter (mm) | 49.5 |
| Shaft Length (mm) (Details pictures) | 36 28 (Goblin 570) |
| Shaft Dia. (mm) | 6/5 |
| Mounting Holes CTC Distance (mm) | NEW! from V3 = 4*M3 in 25mm and 4*M4 in 30mm |
| Mounting Screw | NEW! from V3 = M3 and M4 |
| Max Eff. Curr. | 60.82 93.63 111.03 |
| Max Eff. | 91.12 93.16 93.52 |
| Kt (Nm/A) | 0.0085 |
| Km (Nm/sqrt(w)) | 0.0998 |
| Max Continuous Power(Watts) | 3000 |
| Peak Continuous Power(Watts) (5 sec) | 4000 |
| Max cont. current (A) | 110 |

Figura 35 Motore X-Nova 4025 / 1.5Y-1120KV 8P con caratteristiche tecniche

4.4.3 Schema di collegamento Autopilota batteria servi e ricevente

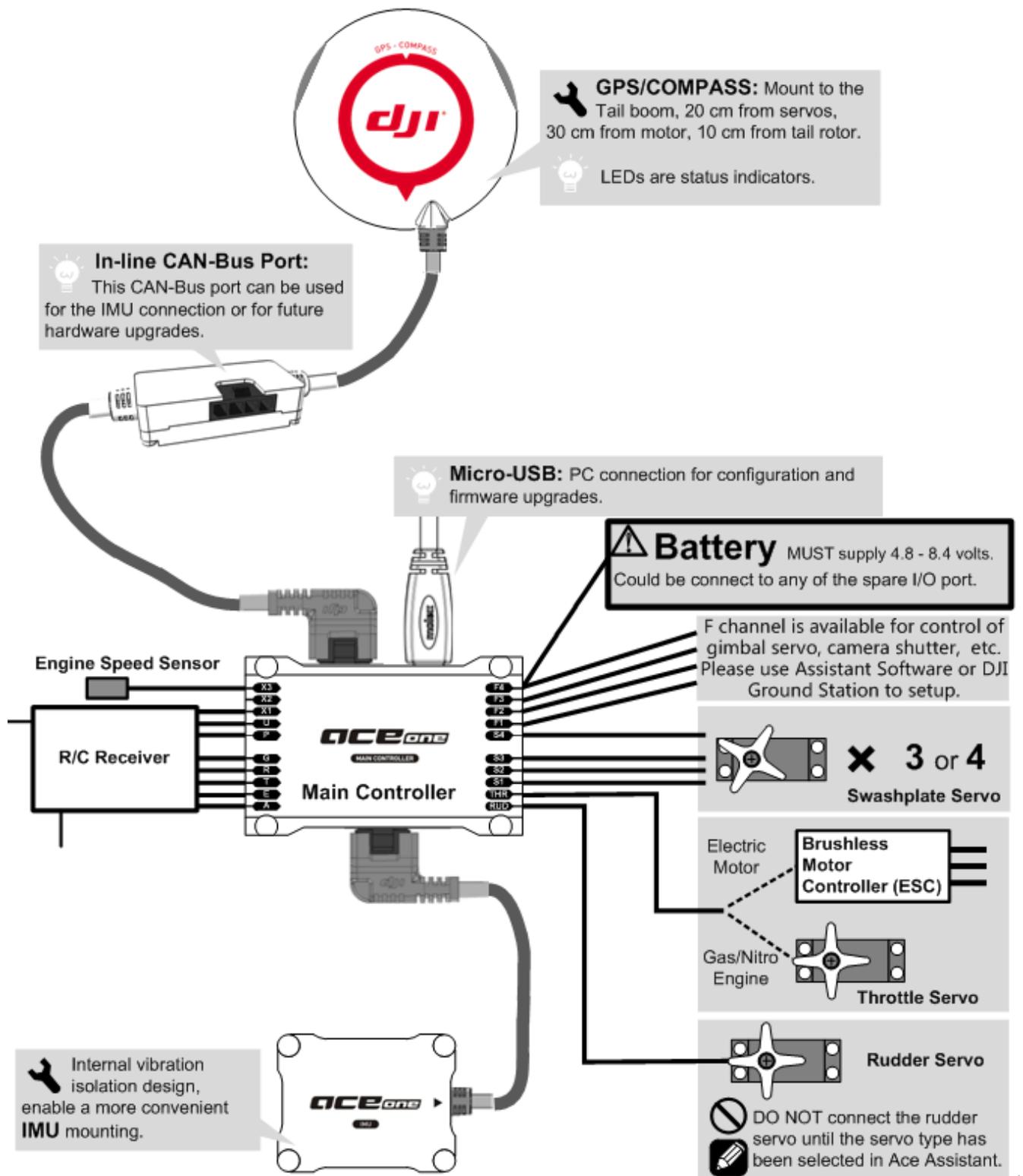
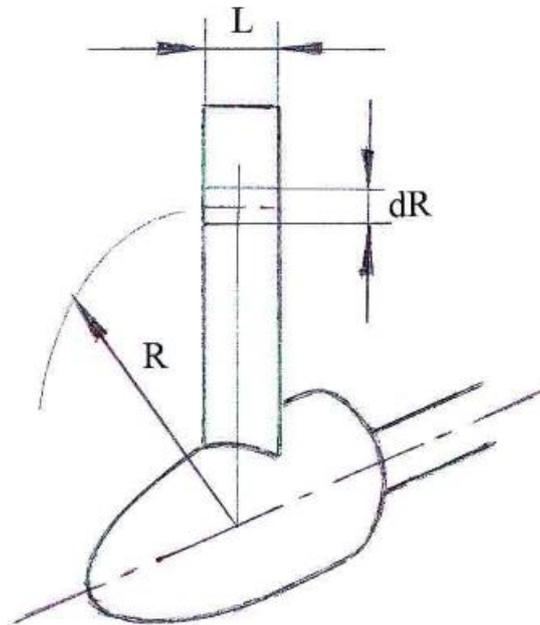


Figura 36 Schema di collegamento Autopilota

4.4.4 Elica

L'elica è un organo propulsivo in grado di trasformare la potenza meccanica di un albero rotante in una variazione di quantità di moto del fluido. Viene sfruttato il principio di azione e reazione per generare trazione. A livello aerodinamico, nel momento in cui le pale vengono poste in rotazione, si crea uno squilibrio di pressioni tra dorso e ventre dell'ordine dei bar. Il flusso attraverso il rotore viene spinto e deviato verso il basso, e per il principio di azione e reazione si genera una spinta uguale e contraria verso l'alto proporzionale all'angolo di attacco effettivo dell'elica.

Possiamo effettuare una stima della Trazione e della Potenza di un'elica:



Prendiamo in esame una singola pala dell'elica che per semplicità supponiamo sia di larghezza L costante lungo il raggio. Prendiamo inoltre in considerazione la superficie infinitesima dell'elica $dS = L dR$ che al generico raggio R ruota con velocità tangenziale $u = \omega R = 2 \pi n R$. Tale pala riceve una spinta infinitesima la cui componente assiale può essere scritta come:

$$dT = 1/2 \rho K_t u^2 dS$$

K_t è un opportuno coefficiente di proporzionalità. Ricordiamo che $u = n R$ e che $dS = L dR$. La formula precedente diventa:

$$dT = \rho Kt' n^2 R^2 L dR$$

Kt' è un nuovo coefficiente di proporzionalità che vale $Kt' 2 \pi^2$. Integrando lungo il raggio da 0 all'estremità e conglobando in Kt' tutte le costanti si ottiene:

$$T = \rho Kt'' n^2 L R^3$$

Ma nella generalizzazione del problema $L = KR$ e introducendo al posto del Raggio d'estremità il diametro D otteniamo:

$$T = \rho Ct n^2 D^4$$

Il tiro di un'elica dipende, oltre che dalla densità dell'aria, dal quadrato della sua velocità di rotazione e dalla quarta potenza del diametro. Quest'ultimo parametro spiega come mai i rotori degli elicotteri abbiano eliche così grandi. Tuttavia bisogna stare attenti, in quanto il diametro D e la sua velocità di rotazione n non possono essere indipendenti l'uno dall'altra; bisogna infatti contenere la sollecitazione centrifuga della pala, limitando la velocità tangenziale u della sua estremità, in quanto tale sollecitazione è proporzionale al quadrato di detta velocità. Ricordando infatti che $u = \pi n D$, si deduce che il prodotto $n D$ non possa superare il limite derivante dalla capacità meccanica di resistenza dell'elica all'azione centrifuga. Detto ciò, si giunge a dire che il tiro dell'elica cresce con il quadrato delle sue dimensioni reali. Ciò spiega il perché dell'enorme diametro del rotore dell'elicottero che ha bisogno almeno di un tiro pari al suo peso.

$$T \propto D^2$$

Sulla base dello schema iniziale, si può valutare anche una stima della potenza spesa che il motore deve mettere a disposizione dell'elica. Prendiamo in considerazione la resistenza tangenziale dF :

$$dF = \frac{1}{2} \rho Kp u^2 dS$$

con Kp un opportuno coefficiente.

$$dF = \rho Kp'n^2 R^2 L dR$$

Allo stesso raggio il momento infinitesimo $dM = R dF$

$$dM = \rho Kp'n^2 R^3 L dR$$

La potenza spesa è uguale a $P_{spesa} = 2 \pi n dM$

$$dP_{spesa} = \rho Kp''n^3 R^3 L dR$$

con Kp'' un nuovo coefficiente che vale $Kp' 2 \pi^2$

Integrando tra 0 e il raggio massimo e conglobando il Kp''' tutte le costanti:

$$P_{spesa} = \rho Kp''' n^3 L R^4$$

Ma $L = K R$ e mettendo al posto di R il diametro D ottengo:

$$P_{spesa} = \rho Cp n^3 D^5$$

Si può osservare che la potenza assorbita è estremamente sensibile alla dimensione dell'elica, perché cresce con la quinta potenza del diametro, ma anche con il cubo nella velocità di rotazione.

5. PREPARAZIONE ELICOTTERO PER ATTIVITA' SPERIMENTALE



Figura 37 Goblin 570 per attività di sperimentazione

Una volta assemblato l'elicottero in tutte le sue parti meccaniche ed elettroniche e testato in volo, ci siamo preoccupati dell'attività sperimentale. E' stato subito chiaro che non era possibile raccogliere dati su banco prova in laboratorio, ma era necessario raccogliere dati durante la vera fase operativa di volo. Il primo problema è stato quello di equipaggiare l'elicottero con un wattmetro, uno strumento per la misura della potenza elettrica.

5.1 Wattmetro

Come accennato precedentemente, il wattmetro è uno strumento in grado di misurare corrente e tensione. Di conseguenza, si può risalire al calcolo della potenza assorbita dall'elicottero ricordando che:

$$P = V I$$

dove V è la tensione elettrica e I la corrente elettrica.

Tale strumento è stato collocato tra la batteria dell'elicottero e il regolatore ESC da 100 A, quest'ultimo collegato al motore brushless.



Figura 38 Wattmetro

Per un corretto funzionamento e utilizzo del sensore, è stato necessario effettuare una calibrazione (vedremo in seguito) sia in corrente che in tensione. Il modello di wattmetro utilizzato è un AttoPilot con corrente massima misurabile di 150A.

5.2 Arduino

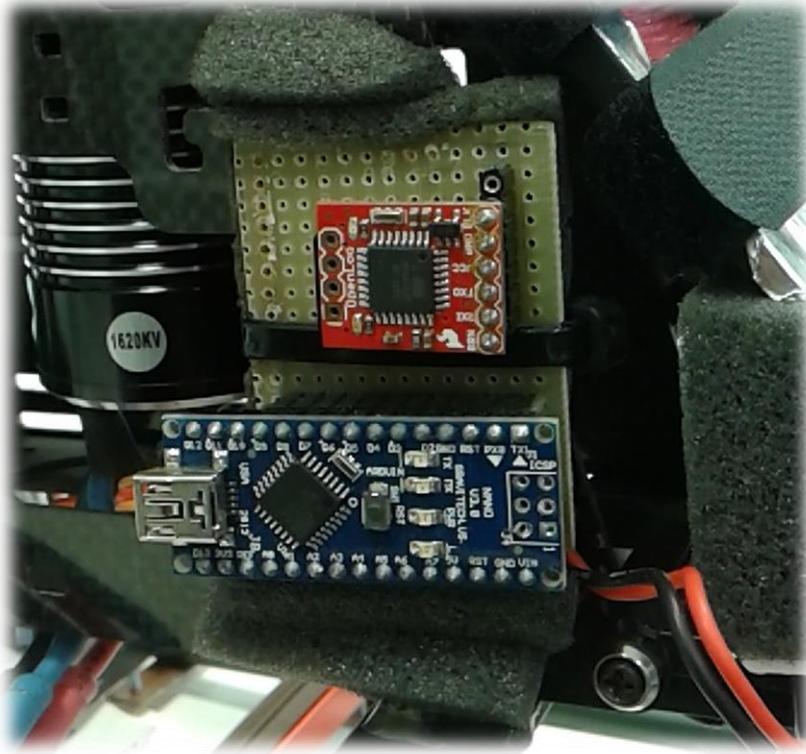


Figura 39 Arduino con scheda SD

Come già accennato, non essendo possibile controllare periodicamente a vista i parametri forniti dal wattmetro, si è ricorso alla realizzazione e alla programmazione di Arduino (Figura 39), con scheda di memoria SD. Arduino è collegato al wattmetro e periodicamente memorizza le grandezze fondamentali in un file .TXT.

Tramite i pin analogici vengono letti gli output in corrente e tensione del wattmetro e successivamente convertiti in segnali digitali.

La programmazione avviene modificando uno script in base alle richieste volute. Durante la scrittura dello script, è possibile variare la durata del tempo di acquisizione e gli intervalli di tempo di campionamento. Successivamente, tale script viene caricato tramite cavo USB su Arduino. Nel nostro studio, lo script è stato modificato per ottenere parametri di:

- Tempo in [ms]
- Volt [V]
- Ampere [A]
- Watt [W]
- Ampere/ora [Ah]
- Watt/ora [Wh]
- V_raw
- A_raw

- RPM
- RPM_filtered

Di seguito, una piccola parte del file .TXT dato in output da Arduino durante la fase di volo:

```

0Payload_originalBladePOMER - Blocco note
File Modifica Formato Visualizza ?
System Time [ms] | V | A | Watt | Ah | Wh | V_raw | A_raw | RPM | RPM_filtered
513016,513016,25.28,1.54,38.89,0.00,0.01,346.38,0.02,0,0
1028504,515488,25.21,1.54,38.77,0.00,0.01,345.40,0.02,2,2
1544052,515548,25.26,1.53,38.75,0.00,0.02,346.10,0.00,2,2
2059464,515412,25.27,1.53,38.76,0.00,0.02,346.16,0.00,2,2
2575040,515576,25.26,1.54,38.86,0.00,0.03,346.14,0.02,0,0
3090488,515448,25.26,1.54,38.85,0.00,0.03,346.06,0.02,0,0
3605972,515484,25.19,1.68,42.39,0.00,0.04,345.20,0.70,0,0
4121560,515588,25.12,3.06,76.93,0.00,0.05,344.24,7.20,0,0
4637172,515612,25.14,2.13,53.50,0.00,0.06,344.48,2.80,155,136
5152992,515820,25.02,3.76,94.05,0.00,0.07,342.94,10.48,285,253
5668980,515988,24.82,5.73,142.18,0.00,0.09,340.28,19.76,437,401
6184996,516016,24.74,7.64,188.89,0.00,0.12,339.26,28.74,598,552
6701108,516112,24.67,7.83,193.21,0.01,0.15,338.40,29.66,703,690
7217480,516372,24.65,7.53,185.61,0.01,0.17,338.12,28.24,789,770
7733660,516180,24.18,13.70,331.24,0.01,0.22,331.94,57.30,984,950
8249936,516276,24.05,15.07,362.50,0.01,0.27,330.28,63.76,1122,1104
8766448,516512,24.03,15.13,363.45,0.01,0.32,329.96,64.02,1221,1216
9282964,516516,24.05,13.97,336.00,0.02,0.37,330.24,58.58,1288,1286
9799720,516756,24.12,13.83,333.58,0.02,0.42,331.14,57.92,1344,1330
10316244,516524,24.11,13.06,314.98,0.02,0.47,331.08,54.30,1358,1359
10832920,516676,24.16,13.07,315.87,0.02,0.51,331.66,54.36,1358,1382
11349708,516788,24.08,14.79,356.31,0.02,0.56,330.68,62.46,1394,1407
11866640,516932,23.66,21.21,501.67,0.03,0.63,325.08,92.66,1530,1533
12383352,516712,23.40,23.83,557.60,0.03,0.71,321.70,105.02,1689,1650
12900428,517076,23.39,24.87,581.70,0.03,0.80,321.52,109.94,1829,1770

```

5.2.1 Programma Arduino

```

#define VOLT_PIN      A1    // PIN di INGRESSO del segnale del voltmetro
#define CUR_PIN      A0    // PIN di INGRESSO del segnale dell' amperometro

#define V_P1  0.07643
#define V_P2  0.1954

#define A_P1  0.2617
#define A_P2  0.9773

#define N_CONSECUTIVE_SAMPLE  1000

#

void setup()
{
  int i= 0 ;

```

```

Serial.begin(115200); // valutazione del bit rate di comunicazione fra il PC
e l' Arduino

// printAnalogTrust();
offset_calculation();

Serial.println("System Time [ms] | V | A | Watt | Ah | Wh | V_raw | A_raw | RPM |
RPM_Filtered "); // Stampa video dei valori acquisiti dai sensori
}

float thrust_offset = 0;
float torque_offset = 0;

void offset_calculation(){
}

double powerUsed = 0;
double currentUsed = 0;
unsigned long int lastSampleTime = 0;
unsigned long int sampleTime = 0;
unsigned long int samplePeriod = 0;

void loop()
{
int i = 0;
int j=0,k=0;

float volt_value = 0;
float volt = 0;
unsigned long int volt_analog_ch=0;

float current_value = 0;
float current = 0;
unsigned long int current_analog_ch=0;

// lettura di segnali analogici provenienti dai sensori

for (i=0 ; i < N_CONSECUTIVE_SAMPLE; i++)
{
volt_analog_ch += analogRead(VOLT_PIN);
current_analog_ch += analogRead(CUR_PIN);
delay(10);
}

volt_value = (float) volt_analog_ch / N_CONSECUTIVE_SAMPLE;
volt = volt_value * V_P1 + V_P2 ;

current_value = (float) current_analog_ch / N_CONSECUTIVE_SAMPLE;
current = current_value*A_P1 + A_P2;

sampleTime = micros();
samplePeriod = sampleTime - lastSampleTime;
lastSampleTime = sampleTime;

currentUsed += (float) (current * samplePeriod) / (float) 3600000000;
powerUsed += (float) (volt * current * samplePeriod) / (float) 3600000000;

Serial.print(sampleTime);
Serial.print(",");
Serial.print(samplePeriod);
Serial.print(",");
Serial.print(volt);
Serial.print(",");
Serial.print(current);
Serial.print(",");
Serial.print(volt * current);
Serial.print(",");
Serial.print(currentUsed);
Serial.print(",");
Serial.print(powerUsed);
Serial.print(",");
Serial.print(volt_value);
Serial.print(",");

```

```

Serial.println(current_value);
Serial.print(",");
Serial.println(RPM);
Serial.print(",");
Serial.println(RPM_Filtered);
}

```

5.3 Calibrazione

Prima di effettuare i test per l'acquisizione dati, è necessario calibrare gli strumenti di misurazione, ossia il wattmetro. Esso ha due output, quindi occorre effettuare una calibrazione per la tensione e una per la corrente. La calibrazione è stata effettuata collegando il wattmetro posto sull'elicottero ad un generatore regolabile di corrente, e successivamente ad uno di tensione. Questo processo consiste nell'associare a tensioni e correnti nominali una misura del canale analogico letta da Arduino.

Si collega quindi il wattmetro all'alimentatore. Inizialmente non si ha nessun carico, quindi non scorrerà corrente. Per far avvenire ciò, si chiude il circuito con un carico elettronico, ossia un simulatore di resistenza.



Figura 40 Schema a blocchi utilizzato per calibrazione Arduino

Il carico elettronico permette di regolare la corrente assorbita dall'alimentatore. Poiché si ha una corrente nota, si può visualizzare la misura corrispondente del canale analogico.

Tali misure vengono plottate su Matlab e, attraverso la funzione Curve Fitting, interpolate da una polinomiale di primo grado:

$$f(x) = p1 * x + p2$$

Si procede allo stesso modo, variando la tensione nota tramite il carico elettronico.

I coefficienti p1 e p2 sono ottenuti sia per la calibrazione in corrente che in tensione, e vanno inseriti nel programma del microcontrollore Arduino per l'elaborazione dati.

Di seguito viene riportato il grafico della calibrazione in tensione con relativi valori di p1 e p2 con grado di accuratezza del 95%.

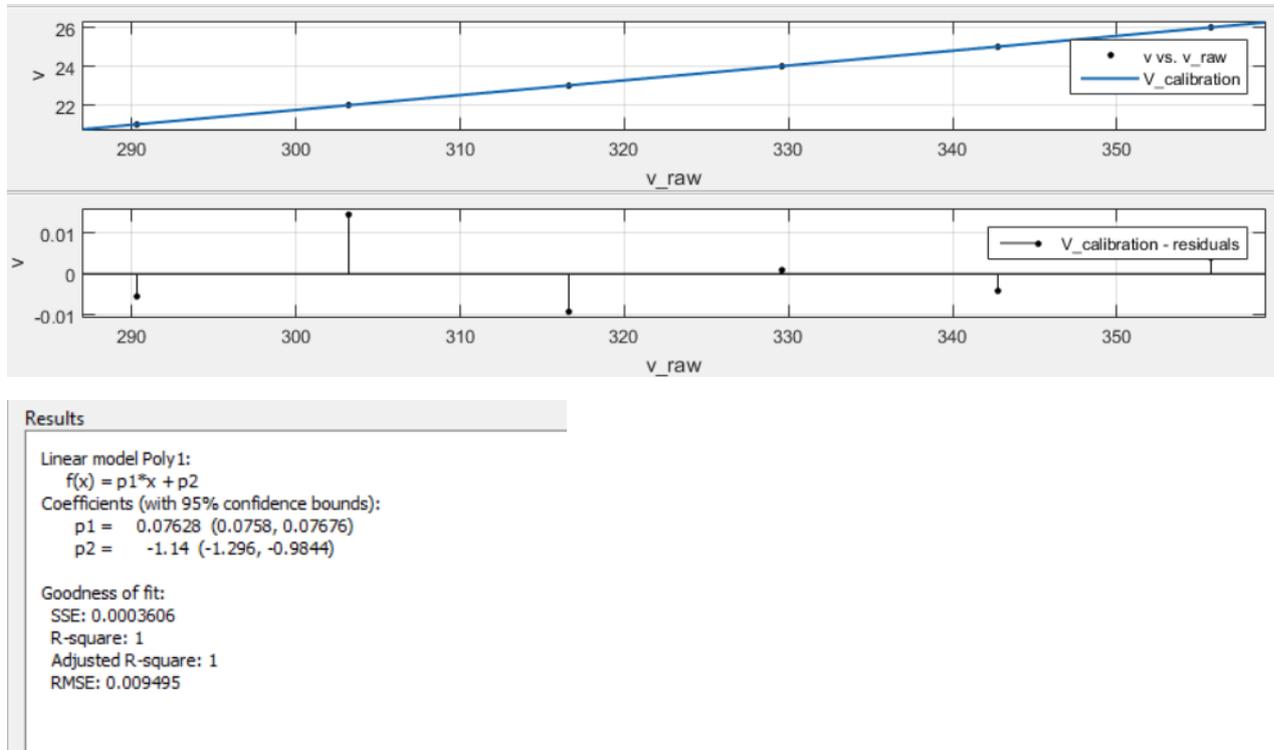


Figura 41 Grafico della calibrazione in tensione del wattmetro con relativi valori p1 e p2

Segue grafico della calibrazione in corrente con relativi valori di p1 e p2 con grado di accuratezza del 95%.

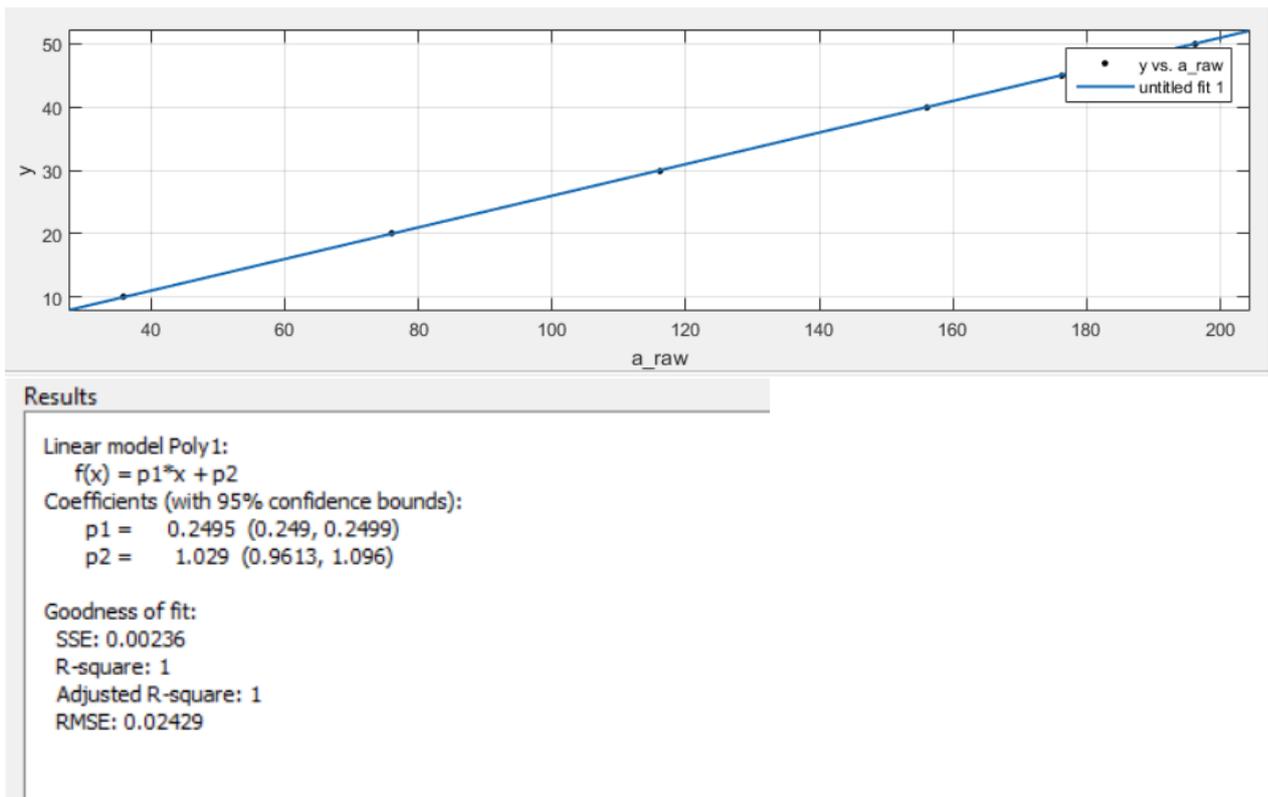


Figura 42 Grafico della calibrazione in corrente del wattmetro con relativi valori p1 e p2

6. ATTIVITA' SPERIMENTALE

L'acquisizione dati è avvenuta in parte presso il campo volo di Villafranca, e in parte presso la galleria del vento CICLOPE di Predappio.

Sono stati effettuati successivi voli in hovering rispecchiando i seguenti parametri:

- Durata totale di volo di circa 120 secondi, di cui 70 secondi di volo inerente l'hovering in modalità ATTI+GPS con aumento ciclico della massa di payload da 1Kg a 4Kg con passo di 1Kg
- Quota costante
- Voli sempre effettuati con batteria carica al 22.2V di tensione nominale

Sono stati effettuati questi voli dapprima con pale originali, e successivamente con pale di nuova generazione Thunderbolt. Queste ultime differiscono dalle pale originali, in quanto hanno un nuovo design con variazione di profilo e di corda lungo il raggio.

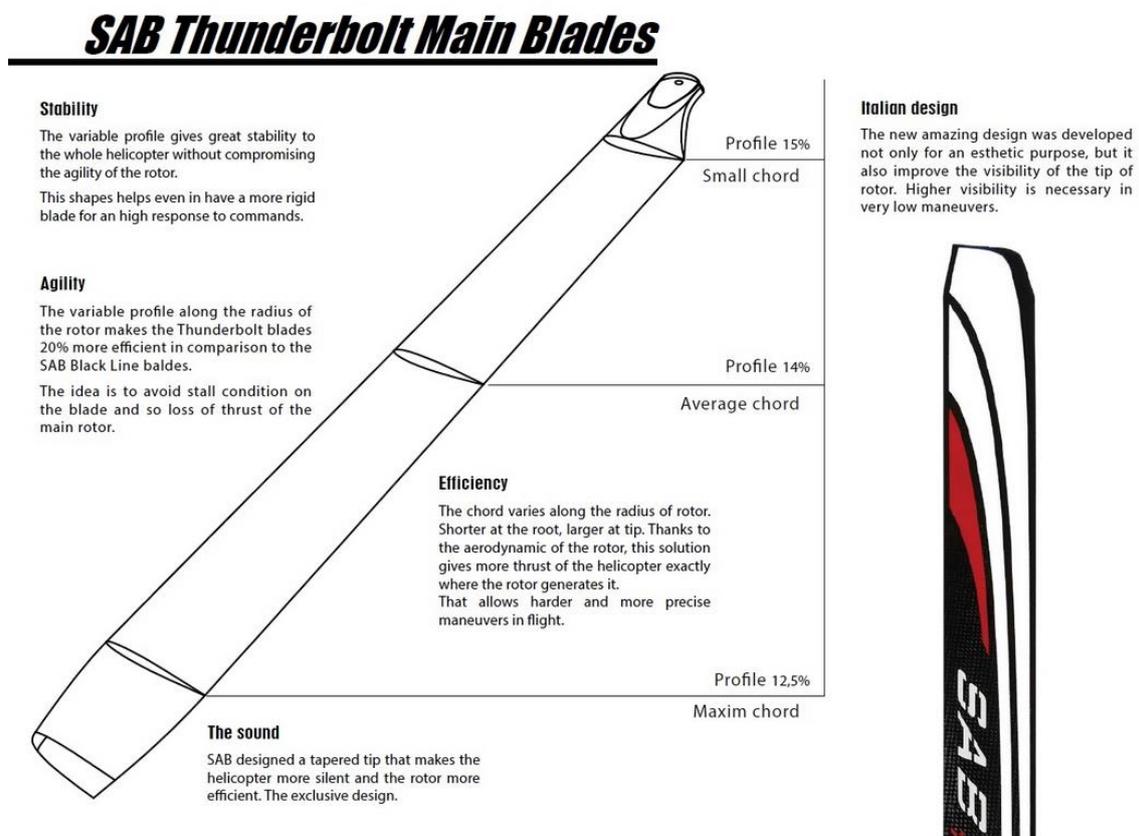


Figura 43 Caratteristiche Pale Thunderbolt

Per ogni payload e per ogni pala sono stati acquisiti valori reali di:

- Tensione
- Corrente
- Potenza
- RPM
- Pitch di hovering

Inoltre, si è cercato di mantenere i giri del rotore principale più o meno costanti, agendo tramite trasmettente regolando la curva del throttle da payload in payload.

Naturalmente, le condizioni meteorologiche non sono state sempre costanti; sono stati effettuati più voli per condizioni di payload, e successivamente è stata calcolata la media dei risultati.

Successivamente, tali grandezze sono state implementate tramite Matlab.

Di seguito, i grafici inerenti ad un singolo volo: volo effettuato con 3 Kg di payload con Original Blade:

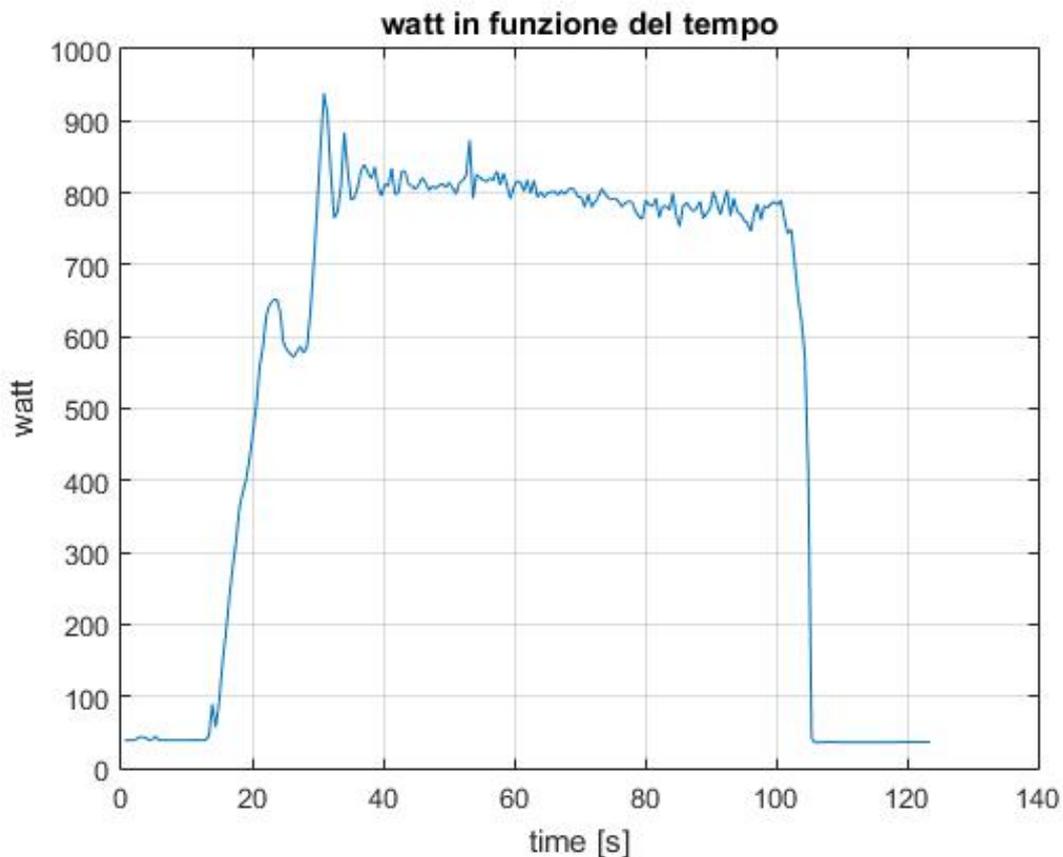


Figura 44 Grafico dei Watt in funzione del tempo Payload 3 Kg Original Blade

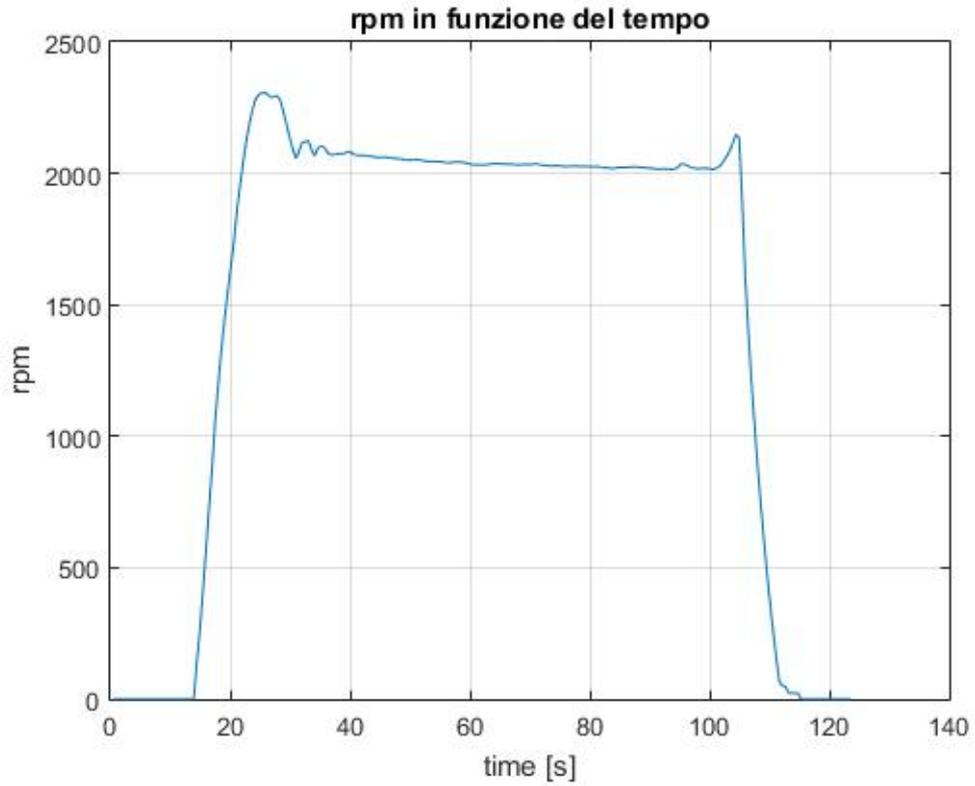


Figura 45 Grafico degli RPM in funzione del tempo 3 Kg payload Original Blade

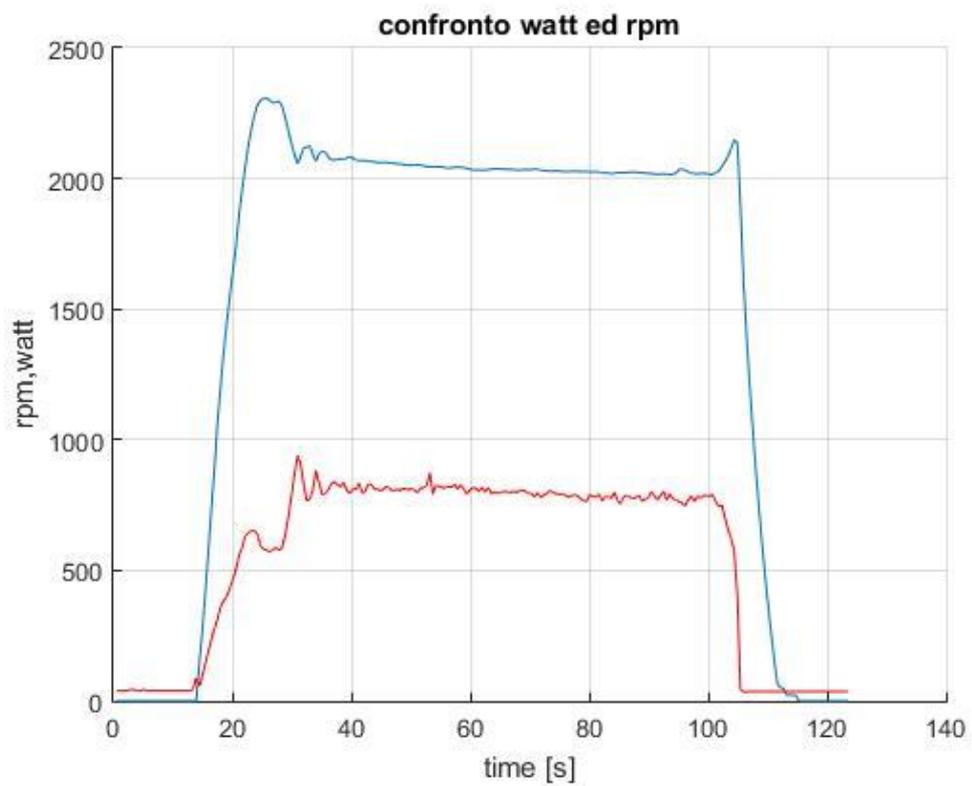


Figura 46 Grafico del confronto tra Watt e RPM in funzione del tempo 3Kg payload Original Blade

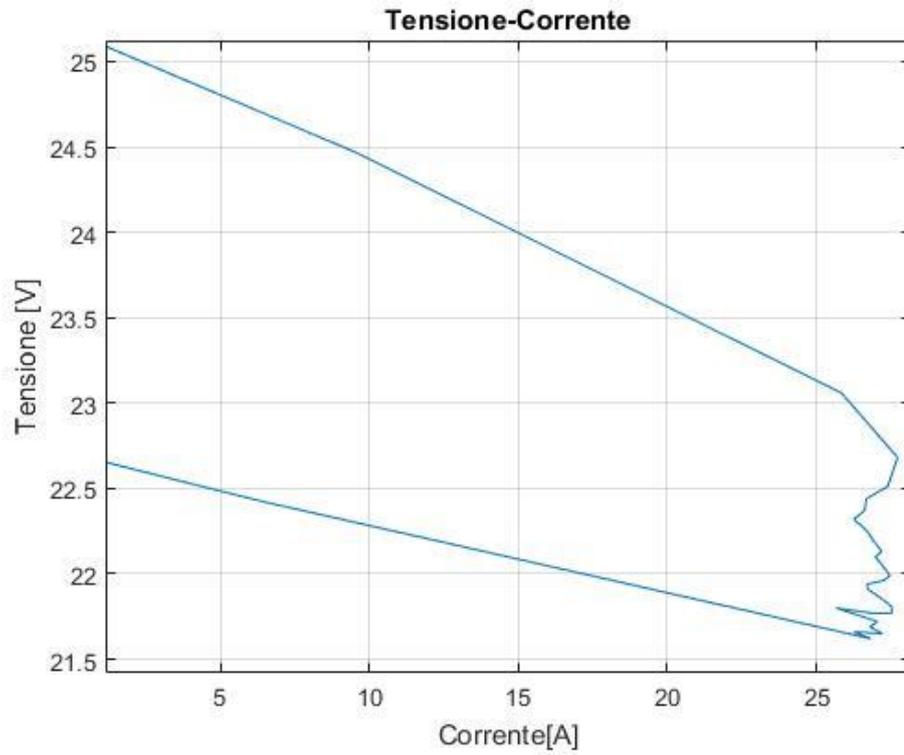


Figura 47 Grafico di scarica della batteria: Tensione in funzione degli Ampere

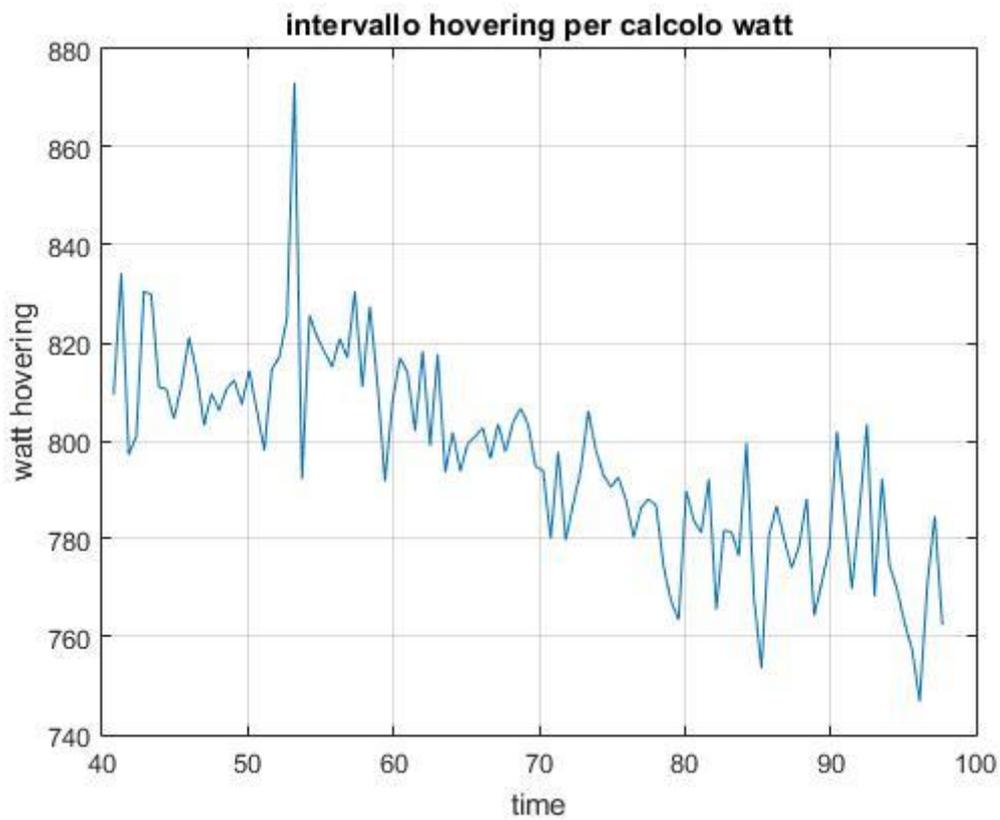


Figura 48 Grafico dell'intervallo di hovering per il calcolo dei Watt in funzione del tempo

Di seguito sono tabulati i risultati ottenuti ad ogni volo:

| Prova 1 Original Blade | | | | |
|---------------------------|----------------|----------|---------------|-----------|
| Payload | Potenza motore | Mean RPM | Mean Watt [W] | Pitch [°] |
| 0 Kg Payload | 70% | 2060 | 567 | ≈4.6 |
| | 75% | 2070 | 555 | ≈4.4 |
| | 80% | 2080 | 600 | ≈4.3 |
| | 85% | 2090 | 592 | ≈4.2 |
| | 90% | 2108 | 610 | ≈4.1 |
| Prova 1 Thunderbolt Blade | | | | |
| Payload | Potenza motore | Mean RPM | Mean Watt [W] | Pitch [°] |
| 0 Kg Payload | 65% | 1925 | 564 | ≈4.4 |
| | 70% | 2005 | 614 | ≈4.2 |
| | 75% | 2050 | 623 | ≈4.0 |
| | 80% | 2093 | 628 | ≈3.9 |
| | 85% | 2113 | 630 | ≈3.8 |

Tabella 1 Risultati per 0 Kg Payload

| Prova 2 Original Blade | | | | |
|---------------------------|----------------|----------|---------------|-----------|
| Payload | Potenza motore | Mean RPM | Mean Watt [W] | Pitch [°] |
| 1 Kg Payload | 75% | 2053 | 580 | ≈5 |
| | 75% | 2054 | 594 | ≈4.9 |
| Prova 2 Thunderbolt Blade | | | | |
| Payload | Potenza motore | Mean RPM | Mean Watt [W] | Pitch [°] |
| 1 Kg Payload | 80% | 2085 | 665 | ≈4.3 |
| | 80% | 1985 | 653 | ≈4.4 |

Tabella 2 Risultati per 1 Kg Payload

| Prova 3 Original Blade | | | | |
|---------------------------|----------------|----------|---------------|-----------|
| Payload | Potenza motore | Mean RPM | Mean Watt [W] | Pitch [°] |
| 2 Kg Payload | 80% | 2027 | 689 | ≈6.4 |
| | 80% | 2051 | 679 | ≈5.8 |
| | 80% | 2017 | 679 | ≈5.8 |
| Prova 3 Thunderbolt Blade | | | | |
| Payload | Potenza motore | Mean RPM | Mean Watt [W] | Pitch [°] |
| 2 Kg Payload | 85% | 1939 | 711 | ≈5.3 |
| | 88% | 1951 | 714 | ≈5.3 |

Tabella 3 Risultati per 2 Kg Payload

| Prova 4 Original Blade | | | | |
|---------------------------|----------------|----------|---------------|-----------|
| Payload | Potenza motore | Mean RPM | Mean Watt [W] | Pitch [°] |
| 3 Kg Payload | 85% | 1997 | 753 | ≈7 |
| | 87.5% | 1946 | 724 | ≈6.9 |
| | 87.5% | 2050 | 806 | ≈6.9 |
| | 87.5% | 2050 | 782 | ≈6.9 |
| | 87.5% | 2051 | 768 | ≈6.9 |
| | 87.5% | 2050 | 814 | ≈6.9 |
| Prova 4 Thunderbolt Blade | | | | |
| Payload | Potenza motore | Mean RPM | Mean Watt [W] | Pitch [°] |
| 3 Kg Payload | 75% | 1889 | 768 | ≈6.4 |
| | 80% | 1988 | 813 | ≈6.3 |
| | 80% | 1937 | 799 | ≈6 |
| | 82.5% | 1941 | 750 | ≈6 |
| | 82.5% | 1978 | 761 | ≈6 |
| | 82.5% | 1997 | 856 | ≈6.3 |

Tabella 4 Risultati per 3 Kg Payload

| Prova 5 Original Blade | | | | |
|---------------------------|----------------|----------|---------------|-----------|
| Payload | Potenza motore | Mean RPM | Mean Watt [W] | Pitch [°] |
| 4 Kg Payload | 87.5% | 1996 | 908 | ≈7.1 |
| | 90% | 2091 | 893 | ≈7.1 |
| | 92.5% | 2128 | 892 | ≈7.5 |
| | 92.5% | 2087 | 875 | ≈7.4 |
| Prova 5 thunderbolt Blade | | | | |
| Payload | Potenza motore | Mean RPM | Mean Watt [W] | Pitch [°] |
| 4 Kg Payload | 85% | 1993 | 969 | ≈7 |
| | 85% | 1951 | 901 | ≈7.1 |
| | 87.5% | 1985 | 914 | ≈7 |

Tabella 5 Risultati per 4 Kg Payload

Riportiamo nella tabella seguente il valore del MTOW (Maximum takeoff weight) nelle varie configurazioni dell'elicottero.

- Peso elicottero pronto al volo con Original Blade.....3.621 Kg 35.51 N
- Peso elicottero pronto al volo con Thunderbolt Blade.....3.676 kg 36 N

| Original Blade | |
|----------------|----------|
| Payload | MTOW [N] |
| 0 Kg | 35.51 |
| 1 Kg | 45.32 |
| 2 Kg | 55.12 |
| 3 Kg | 64.93 |
| 4 Kg | 76.1 |

Tabella 6 Max Takeoff weight Original Blade

| Thunderbolt Blade | |
|-------------------|----------|
| Payload | MTOW [N] |
| 0 Kg | 36 |
| 1 Kg | 45.86 |
| 2 Kg | 55.66 |
| 3 Kg | 65.47 |
| 4 Kg | 76.63 |

Tabella 7 Max Takeoff weight Thunderbolt Blade

Per l'implementazione dei risultati è stato necessario fare una media ponderata dei valori di Potenza dei rispettivi voli. Tali valori a volte differiscono tra loro, nonostante abbiano lo stesso payload e le stesse potenze; questa differenza di valori è stata causata dalle condizioni meteorologiche, che in alcune prove sono state favorevoli, mentre in altre hanno svantaggiato l'acquisizione dati. Ci sono state infatti giornate soleggiate, altre con piogge leggere, altre con folate di vento improvvise, e altre ancora con vento costante.

| MTOW_OB [N] | Watt_OB |
|-------------|---------|
| 35.51 | 555 |
| 45.32 | 587 |
| 55.12 | 679 |
| 64.93 | 780 |
| 76.1 | 892 |
| MTOW_TB [N] | Watt_TB |
| 36 | 623 |
| 45.86 | 665 |
| 55.66 | 714 |
| 65.47 | 768 |
| 76.63 | 969 |

Tabella 8 riassuntiva potenza assorbita con Original e Thunderbolt Blade in funzione del MTOW

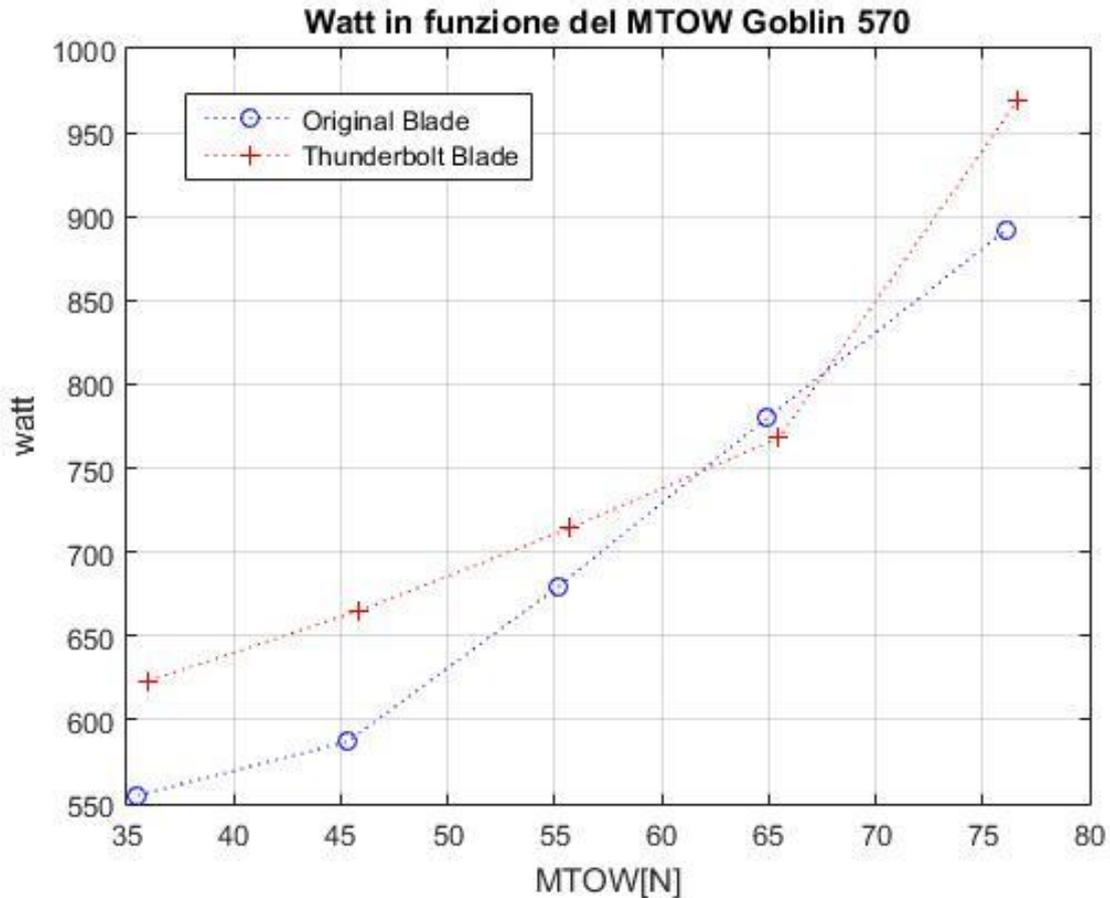


Figura 49 Grafico WATT in funzione del MTOW nelle due configurazioni: in rosso la curva delle Tunderbolt Blade mentre in blu la curva delle Original Blade

Tali curve sono state successivamente interpolate con Curve Fitting attraverso un'esponenziale con un grado di accuratezza del 95%. La curva ottenuta è un tratto di esponenziale, in linea con quanto ipotizzato precedentemente, considerato che per il calcolo della potenza in hovering il peso viene elevato alla 3/2.

$$P_{\text{hovering}} = W_{\text{MTOW}}^{3/2} / f \sqrt{2 \rho A_d}$$

ρ = densità dell'aria;

A_d = Area Disco Rotore Principale;

W_{MTOW} = Peso massimo al decollo;

f = Figura di merito.

DIAGRAMMA POTENZA-PESO Original Blade GOBLIN 570

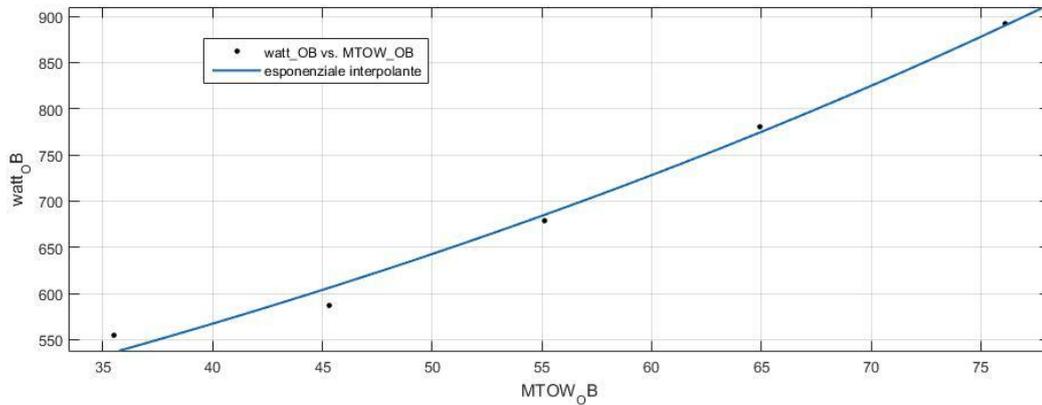


Figura 50 Diagramma Potenza-Peso interpolato con Curve Fitting Original Blade

$$P = a * \exp(b * W)$$

$$a = 344.6$$

$$b = 0.01247$$

DIAGRAMMA POTENZA-PESO Thunderbolt Blade GOBLIN 570

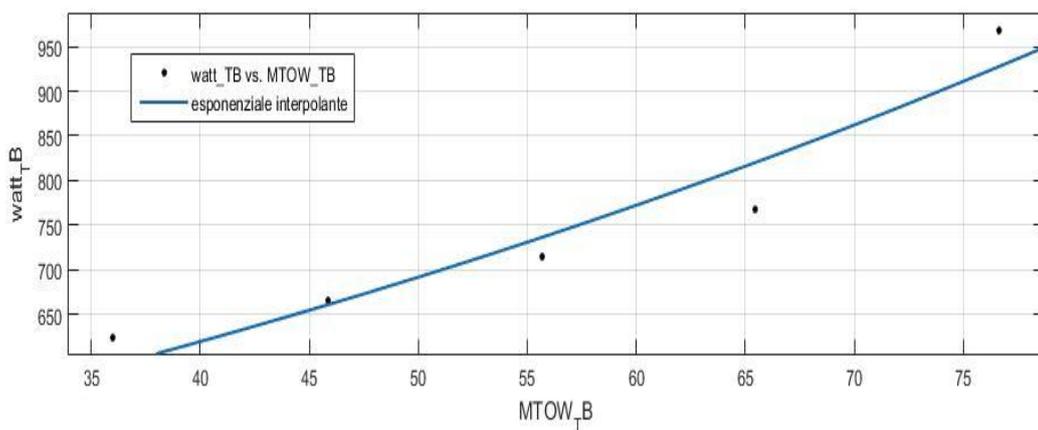


Figura 51 Diagramma Potenza-Peso interpolato con Curve Fitting Thunderbolt Blade

$$P = a * \exp(b * W)$$

$$a = 398.4$$

$$b = 0.01103$$

7. CALCOLO FIGURA DI MERITO

Per figura di merito si intende una quantità utilizzata per caratterizzare le prestazioni di un dispositivo, allo scopo di quantificare la loro utilità per una certa applicazione.

Ricordando che:

$$P_{\text{hovering}} = W_{\text{MTOW}}^{3/2} / f \sqrt{2 \rho A_d}$$

Possiamo ricavare la figura di merito invertendo la formula precedente:

$$f = W_{\text{MTOW}}^{3/2} / P_{\text{hovering}} \sqrt{2 \rho A_d}$$

- $\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$
- $A_d = 1.282 \text{ m}^2$



Figura 52 Dimensioni Goblin 570

| MTOW_OB [N] | f |
|-------------|------|
| 35.51 | 0.21 |
| 45.32 | 0.29 |
| 55.12 | 0.34 |
| 64.93 | 0.37 |
| 76.1 | 0.42 |
| MTOW_TB [N] | f |
| 36 | 0.19 |
| 45.32 | 0.26 |
| 55.12 | 0.33 |
| 64.93 | 0.39 |
| 76.1 | 0.39 |

Tabella 9 Figura di merito per i vari MTOW

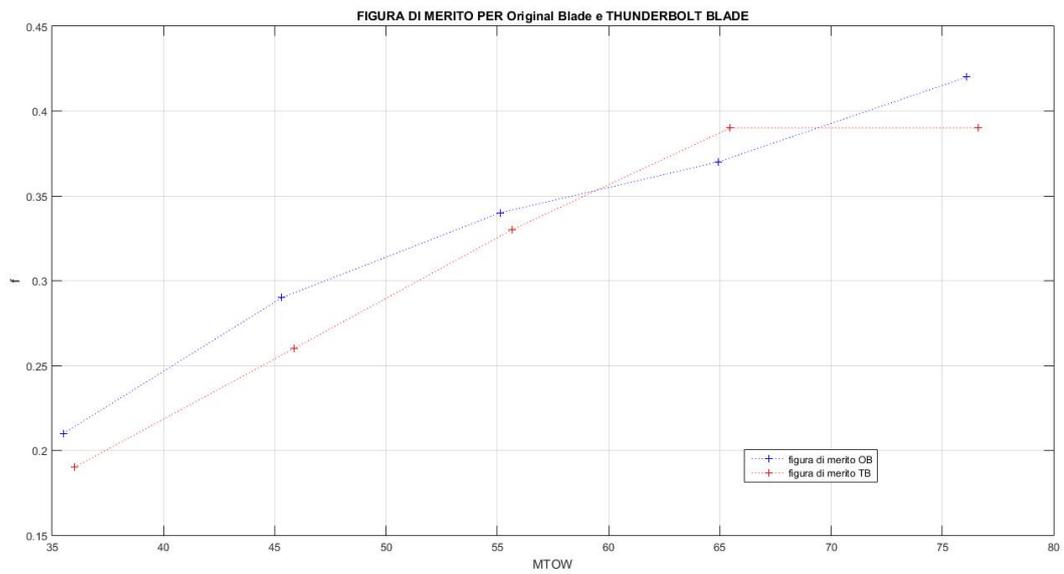


Figura 53 Plottaggio figura di merito in funzione del MTOW

Successivamente interpolate con Curve Fitting:

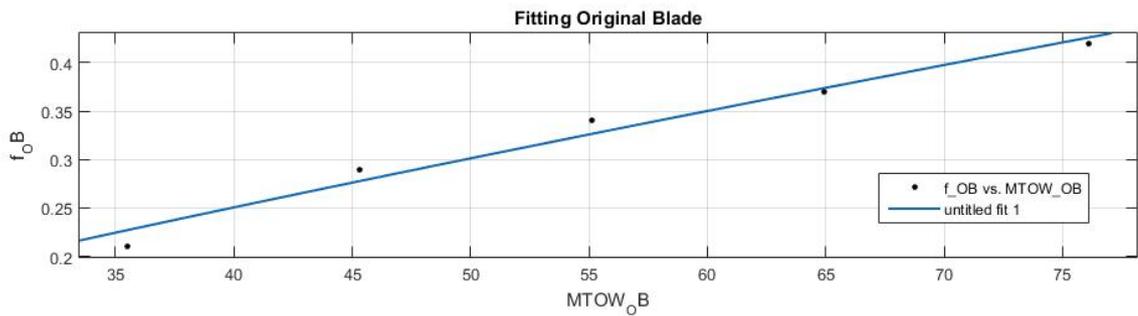


Figura 54 Curve Fitting Figura di merito Original Blade

$$f = a * MTOW^b$$

$$a=0.01195$$

$$b= 0.825$$

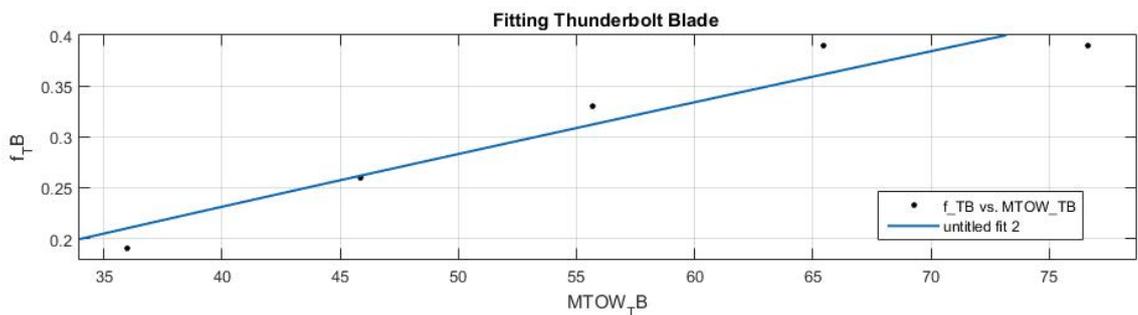


Figura 55 Curve Fitting Figura di merito Thunderbolt Blade

$$f = a * MTOW^b$$

$$a= 0.008136$$

$$b= 0.9073$$

Non è stato possibile effettuare ulteriori voli con aumento di payload. Per questo motivo, non abbiamo raggiunto il massimo peso al decollo sviluppabile dall'elicottero. Prendiamo quindi come riferimento la figura di merito: per le Original Blade 0.42 e per le Thunderbolt Blade 0.39, valori comunque accettabili, trattandosi di un elicottero acrobatico.

8. STIMA DELL'AUTONOMIA ORARIA

Per la stima dell'autonomia oraria è stato necessario implementare la seguente formula in Matlab, sia per le Original Blade che per le Thunderbolt Blade, con successione di capacità di batterie:

$$t_{volato} = \delta \left[\frac{(w_0 + \gamma v_n C)^{\frac{3}{2}}}{f \sqrt{2A_d \rho}} \right]^{\varepsilon} C^{\beta}$$

con γ :

$$\gamma = \frac{w_b}{v_n C}$$

dove:

- $\delta = 24.96$ [N]
- $\varepsilon = -1.01$ [N]
- $\beta = 0.966$
- $v_n = 22.2$ Tensione Nominale Batteria [Volt]
- $f =$ figura di merito: 0.42 per Original Blade 0.39 per Thunderbolt Blade
- $w_0 =$ Peso elicottero: Frame + Avionica senza Batteria in [N]
- $C =$ Capacità Batteria [As]
- $w_b =$ Peso Batteria [N]
- $A_d =$ Area Disco rotore Principale [m²]
- $\rho =$ Densità dell'aria [Kg/m³]
- $t_{volato} =$ Tempo volo

Per la stima e l'implementazione dell'autonomia oraria, sono stati presi valori reali di capacità e peso dichiarati dalla TATTU, un'azienda che progetta batterie. Nella tabella seguente sono riportati i vari parametri di peso e capacità:

| Peso Batteria [N] | Capacità [mAh] |
|-------------------|----------------|
| 1.72 | 1000 |
| 2.35 | 1400 |
| 6.75 | 4500 |
| 6.22 | 5200 |
| 8.68 | 6000 |
| 8.96 | 7000 |
| 9.24 | 8000 |
| 11.50 | 9000 |
| 16.38 | 12000 |
| 20.23 | 16000 |
| 25.99 | 22000 |
| 31.23 | 26000 |
| 33.47 | 28000 |
| 36.02 | 30000 |
| 72.04 | 60000 |
| 108.06 | 90000 |

Tabella 10 Peso Batterie con Capacità

L'implementazione ha fornito i grafici sottostanti in cui abbiamo plottato la capacità della batteria in funzione del tempo di volo.

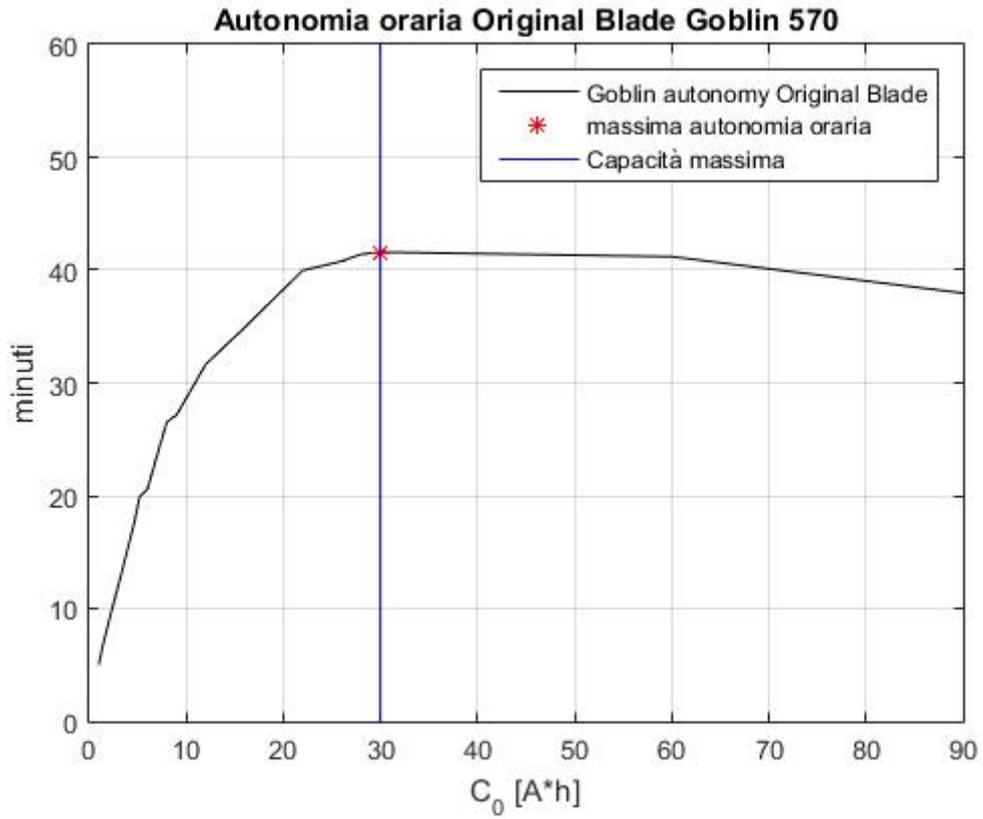


Figura 56 Autonomia oraria in funzione della capacità della batteria Original Blade

Minuti di volo con Original Blade e batteria da 300000 mAh: **41.59**

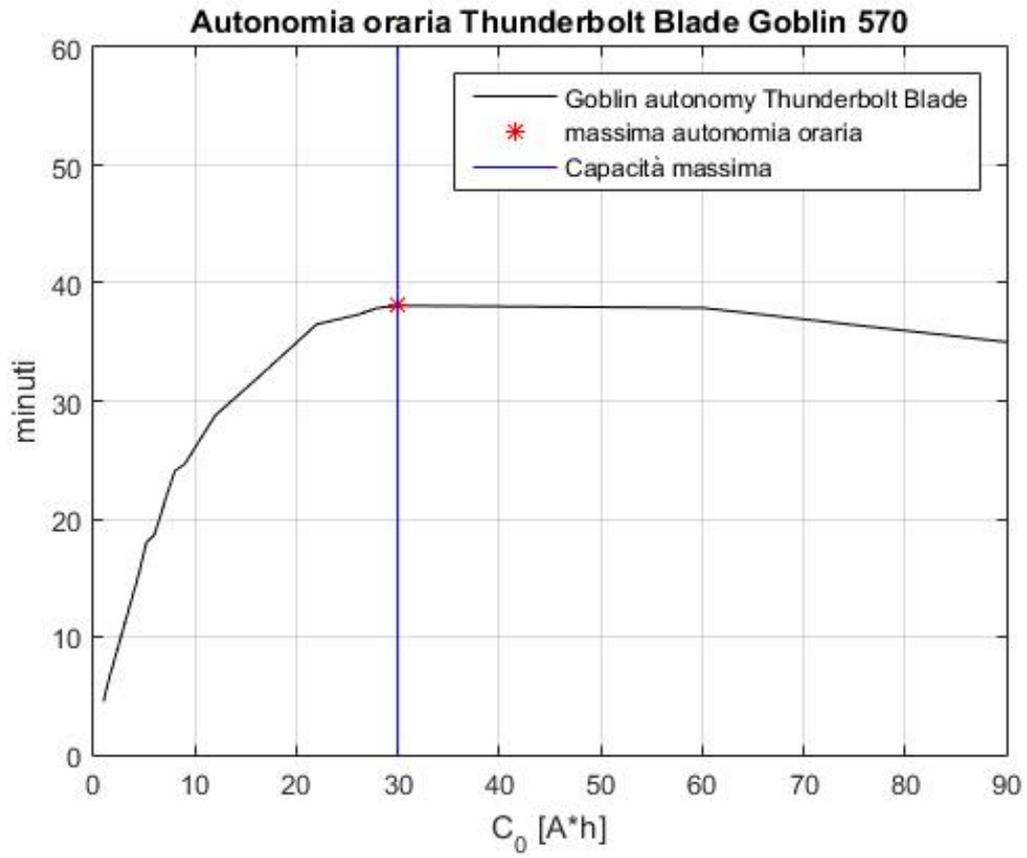


Figura 57 Autonomia oraria in funzione della capacità della batteria Thunderbolt Blade

Minuti di volo con Thunderbolt Blade e batteria da 300000 mAh: **38.08**

Infine, abbiamo ricavato ulteriori grafici del tempo in funzione del MTOW. Nella tabella sottostante sono riportati i valori del MTOW nelle varie configurazioni di batterie.

Per le Original Blade:

| Peso Batteria [N] | MTOW_OB [N] |
|-------------------|-------------|
| 1.72 | 29.33 |
| 2.35 | 29.96 |
| 6.75 | 34.36 |
| 6.22 | 33.83 |
| 8.68 | 36.29 |
| 8.96 | 36.57 |
| 9.24 | 36.85 |
| 11.50 | 39.11 |
| 16.38 | 43.99 |
| 20.23 | 47.84 |
| 25.99 | 53.6 |
| 31.23 | 58.84 |
| 33.47 | 61.08 |
| 36.02 | 63.63 |
| 72.04 | 99.65 |
| 108.06 | 135.67 |

Tabella 11 Mtow_OB in base alla batteria utilizzata

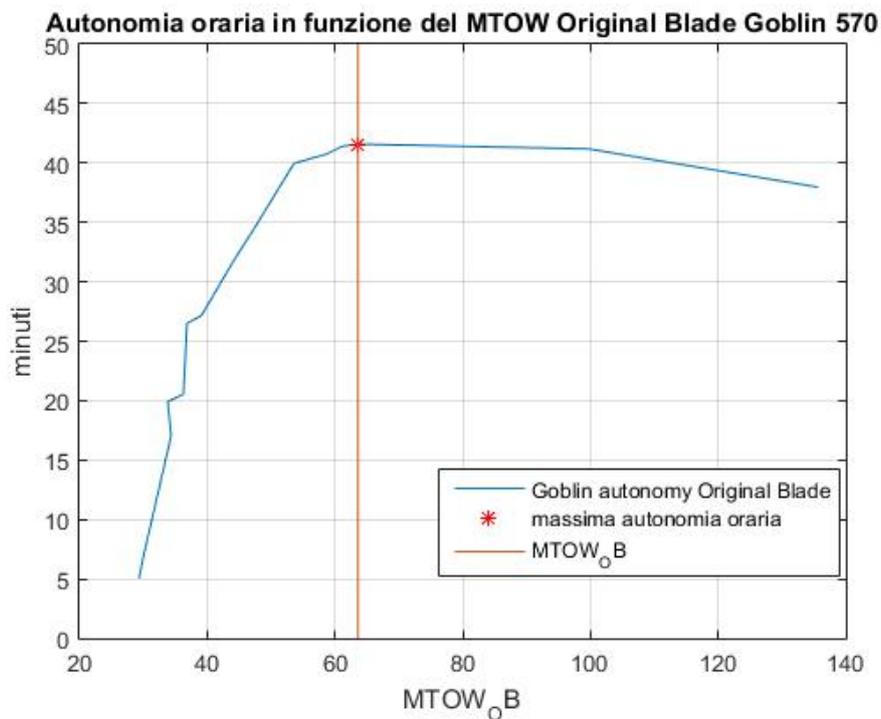


Figura 58 Autonomia oraria in funzione del MTOW_OB

MTOW per Autonomia oraria massima con Original Blade: **63.63 N**

Per le Thunderbolt Blade:

| Peso Batteria [N] | MTOW_TB [N] |
|-------------------|-------------|
| 1.72 | 29.92 |
| 2.35 | 30.55 |
| 6.75 | 34.95 |
| 6.22 | 34.42 |
| 8.68 | 36.88 |
| 8.96 | 37.14 |
| 9.24 | 37.44 |
| 11.50 | 39.7 |
| 16.38 | 44.58 |
| 20.23 | 51.43 |
| 25.99 | 54.19 |
| 31.23 | 59.43 |
| 33.47 | 61.67 |
| 36.02 | 64.22 |
| 72.04 | 100.24 |
| 108.06 | 136.26 |

Tabella 12 Mtow_TB in base alla batteria utilizzata

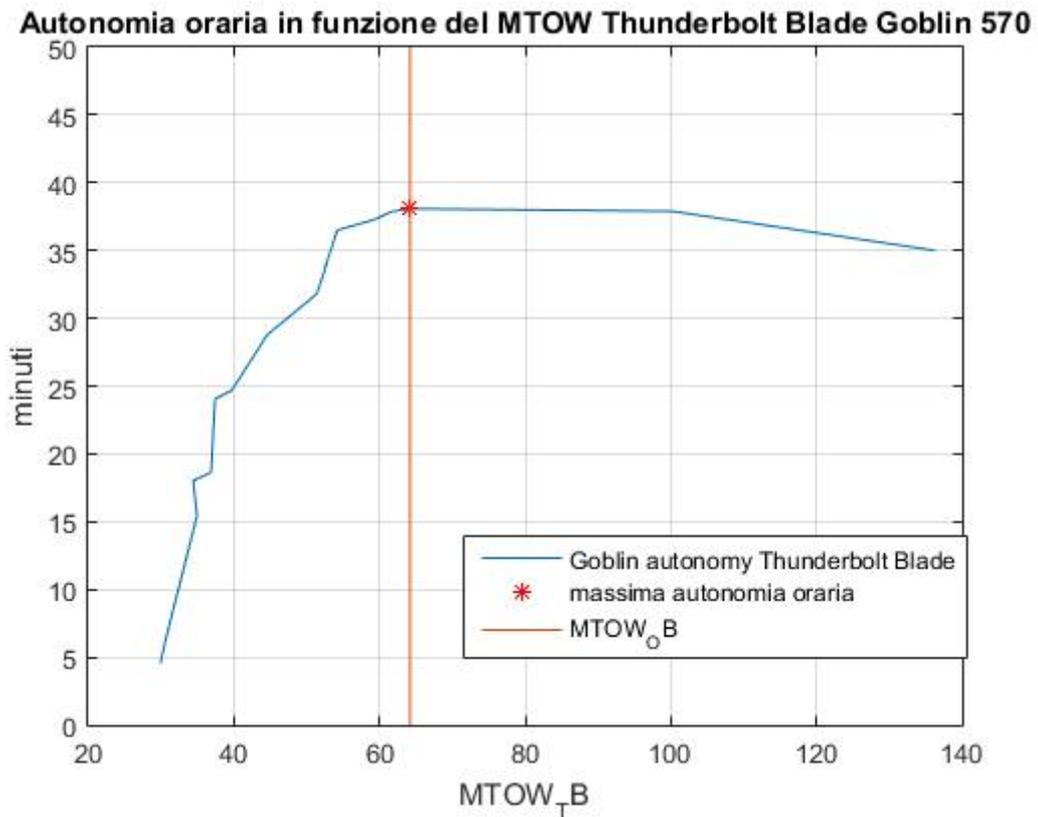


Figura 59 - Autonomia oraria in funzione del MTOW_TB

MTOW per autonomia oraria massima con Thunderbolt Blade: **64.22 N**

9. CONCLUSIONI

Lo studio effettuato si è dimostrato produttivo. Grazie all'acquisizione di dati sperimentali, si è giunti ad una stima dell'autonomia oraria dell'elicottero nelle varie configurazioni.

Si nota che la curva dell'autonomia raggiunge un massimo e poi decresce. Per ottenere l'autonomia oraria massima, bisogna cercare sia di avere una batteria con una capacità nominale che permetta di lavorare nell'intorno del punto di massimo della curva, sia di non superare un certo MTOW dell'elicottero. Il successivo andamento decrescente della curva è giustificato dal fatto che un aumento eccessivo della capacità della batteria, che è direttamente collegato ad un aumento di peso, è controproducente per l'autonomia dell'elicottero.

Nella seguente tabella sono tabulate le conclusioni raggiunte dal suddetto studio:

| | Stima autonomia massima | MTOW per massima autonomia |
|-------------------|-------------------------|----------------------------|
| Elicottero con OB | 41.59 minuti | 63.63 N |
| Elicottero con TB | 38.08 minuti | 64.22 N |

Tabella 13 Risultati conclusivi

Bibliografia

- J. G. Leishman. Principles_of_Helicopter. - D.P. Raymer - Aircraft design A conceptual approach
- D Linden, T. B. Reddy. Handbook of batteries 3° ed.
- M. Holly. MATLAB® for engineers. 3rd ed. 2012 R.A. Michelin, A. Munari. Fondamenti di Chimica. Casa editrice.CEDAM
- M. Gatti, F. Giulietti. Preliminary design analysis methodology for electric aircraft.
- M. Gatti, F. Giulietti. Maximum endurance for battery-powered rotary-wing aircraft

- glielicotteri.altervista.org/funzionamento/comandi/
- www.sabitaly.it/
- <http://www.gizio.it/aerodinaelicottero/ROTORE.htm>
- www.adrirobot.it/arduino/arduino_nano/scheda_arduino_nano.htm
- www.genstattu.com/tattu
- www.icao.int
- www.enac.gov.it
- Dji.com
- bdbatteries.com
- Hobbyking.com

