



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Studio e validazione sperimentale delle prestazioni di un velivolo ad ala rotante in scala ridotta

Relatore:

Professor Fabrizio Giulietti

Presentata da:

Riccardo Cesari

Anno Accademico 2024–2025
30 Ottobre 2025

Alla mia famiglia

Indice

Introduzione	7
1 Contesto generale	10
2 Progettazione CAD 3D e analisi dei momenti di inerzia	12
3 Assemblaggio	17
4 Integrazione dei sistemi di bordo	20
4.1 Panoramica dei sistemi di bordo	20
4.2 Installazione e collegamenti dei componenti	21
4.2.1 Pixhawk 6C	21
4.2.2 Ricevente radio	21
4.2.3 ESC e motore	21
4.2.4 Power Module e batteria	21
4.2.5 GPS e Telemetria	22
4.2.6 Servocomandi	22
4.3 Problemi di alloggiamento e soluzioni progettuali	22
4.4 Mission Planner: funzionalità principali	23
4.5 Installazione firmware e software	23
4.6 Calibrazioni e configurazioni	24
4.7 Verifica finale dei sistemi di bordo	25
5 Previsioni su prove di volo e validazione sperimentale	31
5.1 Obiettivi delle previsioni	31
5.2 Analisi previsionali	32
5.3 Possibili criticità e raccomandazioni	32
5.4 Conclusioni previsionali	33
Conclusioni	34

Bibliografia	37
Ringraziamenti	38

Introduzione

Lo studio dei velivoli ad ala rotante in scala ridotta è un tema molto utile e attuale nell'ingegneria aerospaziale, perché permette di fare prove e valutazioni reali senza dover lavorare subito su modelli a grandezza naturale. In questo modo si possono capire meglio i fenomeni aerodinamici e testare soluzioni progettuali riducendo tempi e costi.

Questa tesi nasce dall'esperienza di tirocinio svolta presso il laboratorio di Meccanica del Volo, con l'obiettivo di progettare, realizzare e collaudare un elicottero in scala ridotta. In particolare, l'attività si è articolata in tre fasi principali: il disegno CAD 3D del velivolo, l'assemblaggio dei componenti meccanici ed elettronici, e infine la valutazione delle prestazioni in volo.

Durante la fase di progettazione sono stati impiegati software di modellazione tridimensionale per definire la geometria complessiva, analizzare la distribuzione delle masse e determinare i momenti d'inerzia, parametri fondamentali per la stabilità e la manovrabilità. Successivamente, si è passati all'assemblaggio fisico, che ha richiesto l'impiego di strumentazioni specifiche per il montaggio della struttura, l'installazione del sistema di propulsione, il cablaggio elettrico e l'integrazione dei sistemi di comunicazione radio. Infine, sono state fatte considerazioni su future prove di volo, evidenziando punti di forza e margini di miglioramento del progetto.

L'elaborato è strutturato come segue:

- **Capitolo 1:** descrizione del contesto e delle motivazioni alla base del progetto;
- **Capitolo 2:** presentazione della fase di progettazione CAD 3D e analisi dei parametri inerziali;
- **Capitolo 3:** illustrazione delle procedure di assemblaggio del velivolo;
- **Capitolo 4:** integrazione dei sistemi elettronici di bordo e calibrazione di essi;
- **Capitolo 5:** considerazioni su future prove di volo e confronto con i dati attesi;

- **Conclusioni:** sintesi dei risultati raggiunti.

In conclusione, questo lavoro descrive l'intero percorso di progettazione, realizzazione e verifica di un velivolo ad ala rotante in scala ridotta, evidenziando l'integrazione tra modellazione digitale, assemblaggio fisico e prove sperimentali. L'obiettivo principale è stato quello di costruire un modello completo e funzionante, con dati concreti sui parametri inerziali e sul comportamento in volo, da confrontare con le previsioni teoriche. La tesi rappresenta quindi una sintesi tra approccio progettuale, capacità di assemblaggio e analisi sperimentale, fornendo un quadro completo delle attività svolte, e dei risultati ottenuti.

Capitolo 1

Contesto generale

Lo studio e la sperimentazione di velivoli ad ala rotante in scala ridotta sono molto rilevanti all'interno della ricerca aerospaziale. L'utilizzo di modelli in scala consente infatti di affrontare e analizzare problematiche reali legate al volo di velivoli, ma con un approccio più semplice e meno costoso rispetto alla realizzazione di prototipi a grandezza naturale. Oltre al risparmio di tempo e risorse, i modelli in scala permettono di effettuare osservazioni dettagliate sul comportamento dinamico, come stabilità, risposta ai comandi e distribuzione dei carichi, fornendo dati preziosi per validare modelli teorici e simulazioni numeriche.

Il contesto di questo lavoro è il laboratorio di Meccanica del Volo, dove vengono sviluppati modelli sperimentali per comprendere meglio la dinamica dei velivoli e per validare approcci progettuali. E' molto importante combinare progettazione teorica, modellazione digitale, assemblaggio fisico e prove sperimentali. La disponibilità di strumenti avanzati, come software CAD 3D, strumentazione per misurazioni precise e sistemi di telemetria, permette di raccogliere dati accurati e confrontarli con le previsioni teoriche.

Le motivazioni alla base di questo lavoro sono legate sia all'interesse scientifico, sia all'aspetto formativo. Dal punto di vista scientifico, la sperimentazione su modelli in scala consente di approfondire aspetti della meccanica del volo, come il comportamento dei rotori, l'influenza della distribuzione delle masse e l'interazione tra sistemi meccanici ed elettronici. Dal punto di vista formativo, sviluppare un prototipo completo permette di applicare le conoscenze acquisite negli anni di studio, integrate con competenze pratiche come l'uso di software di progettazione, la gestione di componenti meccanici ed elettrici e l'organizzazione del lavoro in laboratorio.

Gli obiettivi principali di questo progetto possono essere riassunti in tre punti:

- realizzare il disegno CAD 3D del velivolo, definendo geometria, masse e momenti d'inerzia, fondamentali per analizzare la stabilità e la manovrabilità;

- procedere all'assemblaggio fisico e all'integrazione dei vari sistemi, inclusi propulsione, cablaggio elettrico e comunicazione radio, con attenzione a tolleranze e vincoli meccanici;
- effettuare considerazioni su prove di volo, come prestazioni, stabilità e risposta ai comandi, per confrontare il comportamento reale con i risultati teorici.

Questo lavoro rappresenta quindi un'occasione per mettere in pratica le conoscenze acquisite durante il percorso di studi in Ingegneria Aerospaziale, avvicinandosi al metodo sperimentale e alla gestione di un progetto tecnico completo, dalla progettazione al computer fino al collaudo in volo. La tesi documenta l'intero processo, fornendo un quadro dettagliato delle attività svolte, delle scelte progettuali e dei risultati ottenuti.

Capitolo 2

Progettazione CAD 3D e analisi dei momenti di inerzia

La progettazione e il disegno al CAD è iniziato con una consultazione del manuale di istruzioni del velivolo, per comprendere l'ordine di montaggio dei componenti, ed uno studio approfondito sull'utilizzo del software CAD. L'obiettivo principale era ottenere un modello digitale completo da utilizzare per successive analisi, in particolare per il calcolo dei momenti di inerzia.

Il progetto, come detto poc'anzi, era già in parte definito: erano infatti disponibili tutti i componenti fisici del velivolo, quindi non si è trattato di progettarli da zero, ma piuttosto di replicarli fedelmente al CAD, cercando di rispettare il più possibile le dimensioni reali, le geometrie e le caratteristiche dei materiali. Il lavoro è iniziato con una fase di misurazione diretta dei pezzi tramite calibro e altri strumenti di precisione. Ogni componente è stato analizzato singolarmente, rilevando geometrie, fori, accoppiamenti e caratteristiche costruttive, per garantire una corrispondenza accurata tra il modello digitale e la realtà.

Dopo aver raccolto tutti i dati necessari, si è proceduto alla modellazione componente per componente, mantenendo ordine e precisione nella gestione dei file. Ogni parte è stata realizzata come singolo componente all'interno di Fusion 360, con attenzione ai dettagli che avrebbero influito sull'assemblaggio o sul calcolo dei momenti di inerzia. Alcune geometrie più complesse, come quelle delle pulegge, degli alberi e del piattello oscillante, hanno richiesto particolare cura e diverse iterazioni di prova e verifica.

Durante questa fase, è stata fondamentale anche la gestione dei vincoli e delle relazioni tra le parti, per simulare correttamente i collegamenti meccanici reali. Ogni componente è stato verificato in relazione agli altri, controllando che gli accoppiamenti e gli spazi di movimento fossero corretti, e correggendo eventuali interferenze

rilevate. Questo approccio ha permesso di ottenere un modello digitale coerente e affidabile, che rispecchiasse fedelmente la configurazione finale del velivolo.

Per quanto riguarda i materiali, è stato importante assegnare correttamente proprietà fisiche come densità, massa e volume, poiché questi dati influenzano direttamente i momenti d'inerzia ed il comportamento dinamico del velivolo. Nel dettaglio, i materiali che sono stati utilizzati sono:

- **Alluminio**, impiegato nella maggior parte delle strutture portanti, come telaio e supporti; leggero e resistente, adatto a garantire rigidità con un peso contenuto.
- **Acciaio**, presente nelle trasmissioni, pulegge e alberi; la maggiore densità ha influito in modo significativo sui valori dei momenti di inerzia.
- **PVC**, utilizzato per rivestimenti e scocche secondarie, con funzione prevalentemente protettiva ed estetica.
- **Fibra di carbonio**, impiegata principalmente nelle pale del rotore, grazie all'elevato rapporto tra leggerezza e rigidità, ed in altri componenti soggetti a sollecitazioni cicliche.

Una volta completata la modellazione di tutti i componenti, questi sono stati assemblati all'interno di un unico progetto CAD, applicando i vincoli necessari per riprodurre l'architettura reale del velivolo. In questa fase, oltre a verificare l'assenza di interferenze meccaniche, sono stati simulati i movimenti di rotori e trasmissioni per assicurarsi che ogni elemento rispettasse il range di escursione previsto.

Grazie alla definizione accurata di materiali e masse, è stato possibile sfruttare le funzionalità di analisi del software per ottenere i momenti di inerzia del modello completo rispetto ai tre assi principali. Questi dati costituiscono una base fondamentale per lo studio del comportamento dinamico del velivolo, in particolare per valutare stabilità, controllo e risposta alle manovre. Inoltre, la modellazione digitale ha permesso di individuare eventuali criticità progettuali prima dell'assemblaggio fisico, riducendo i rischi di errori o incompatibilità tra componenti.

L'analisi dei momenti di inerzia del velivolo, calcolati tramite software, fornisce informazioni fondamentali per comprendere il comportamento dinamico del sistema rispetto ai diversi assi principali.

I valori principali lungo gli assi cartesiani sono:

$$I_{xx} = 4.427 \cdot 10^7 \text{ g}\cdot\text{mm}^2$$

$$I_{yy} = 2.065 \cdot 10^8 \text{ g}\cdot\text{mm}^2$$

$$I_{zz} = 2.062 \cdot 10^8 \text{ g}\cdot\text{mm}^2$$

Da questi risultati emerge chiaramente che l'inerzia attorno all'asse longitudinale (x) è sensibilmente inferiore rispetto a quella sugli assi trasversale (y) e verticale (z). Ciò è coerente con la geometria allungata della fusoliera, che oppone minore resistenza alla rotazione longitudinale rispetto ai movimenti di beccheggio e imbardata.

Per quanto riguarda i prodotti d'inerzia (I_{xy}, I_{xz}, I_{yz}), i valori non nulli indicano che gli assi geometrici del modello non coincidono perfettamente con gli assi principali d'inerzia. Ad esempio:

$$I_{xy} = I_{yx} = -4.296 \cdot 10^7 \text{ g}\cdot\text{mm}^2$$

$$I_{xz} = I_{zx} = 4.573 \cdot 10^6 \text{ g}\cdot\text{mm}^2$$

$$I_{yz} = I_{zy} = -6.48 \cdot 10^4 \text{ g}\cdot\text{mm}^2$$

La presenza di questi termini riflette leggere asimmetrie nella distribuzione delle masse, probabilmente dovute alla disposizione non uniforme di componenti interni come pulegge, elementi nella trasmissione, rotore di coda... Tuttavia, i valori di I_{yz} e I_{zy} risultano trascurabili rispetto agli altri, segno che il velivolo mantiene una buona simmetria laterale.

In sintesi, i dati ottenuti confermano che il velivolo presenta:

- buona stabilità attorno agli assi principali, con maggiore resistenza ai movimenti di beccheggio e imbardata;
- asimmetrie limitate, che non compromettono la stabilità.

In conclusione, questa fase di progettazione CAD non rappresenta soltanto un passaggio tecnico, ma costituisce anche un elemento chiave del processo progettuale: consente di collegare la realtà dei componenti fisici con il modello digitale, verificare le proprietà fisiche e preparare il "terreno" per le successive fasi di assemblaggio e prove sperimentali. La precisione nella modellazione, l'accuratezza nelle misurazioni e la gestione attenta dei vincoli hanno garantito che il modello finale fosse coerente con le specifiche progettuali e pronto per essere utilizzato nelle fasi successive.

Questi risultati hanno quindi costituito la base per il passo successivo del lavoro, ovvero l'assemblaggio fisico del velivolo e l'integrazione dei sistemi per renderlo idoneo al volo.

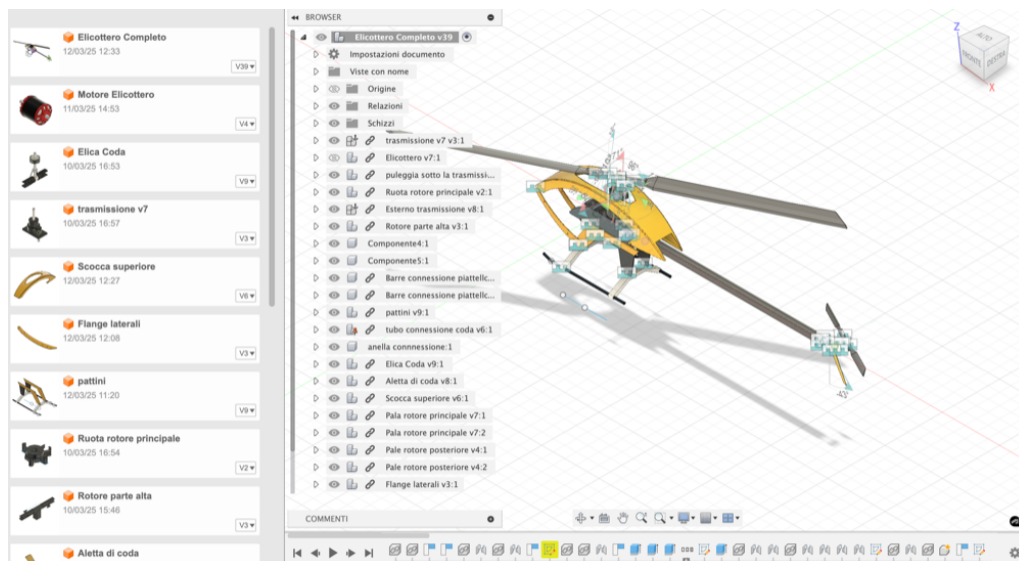


Figura 2.1: CAD velivolo completo

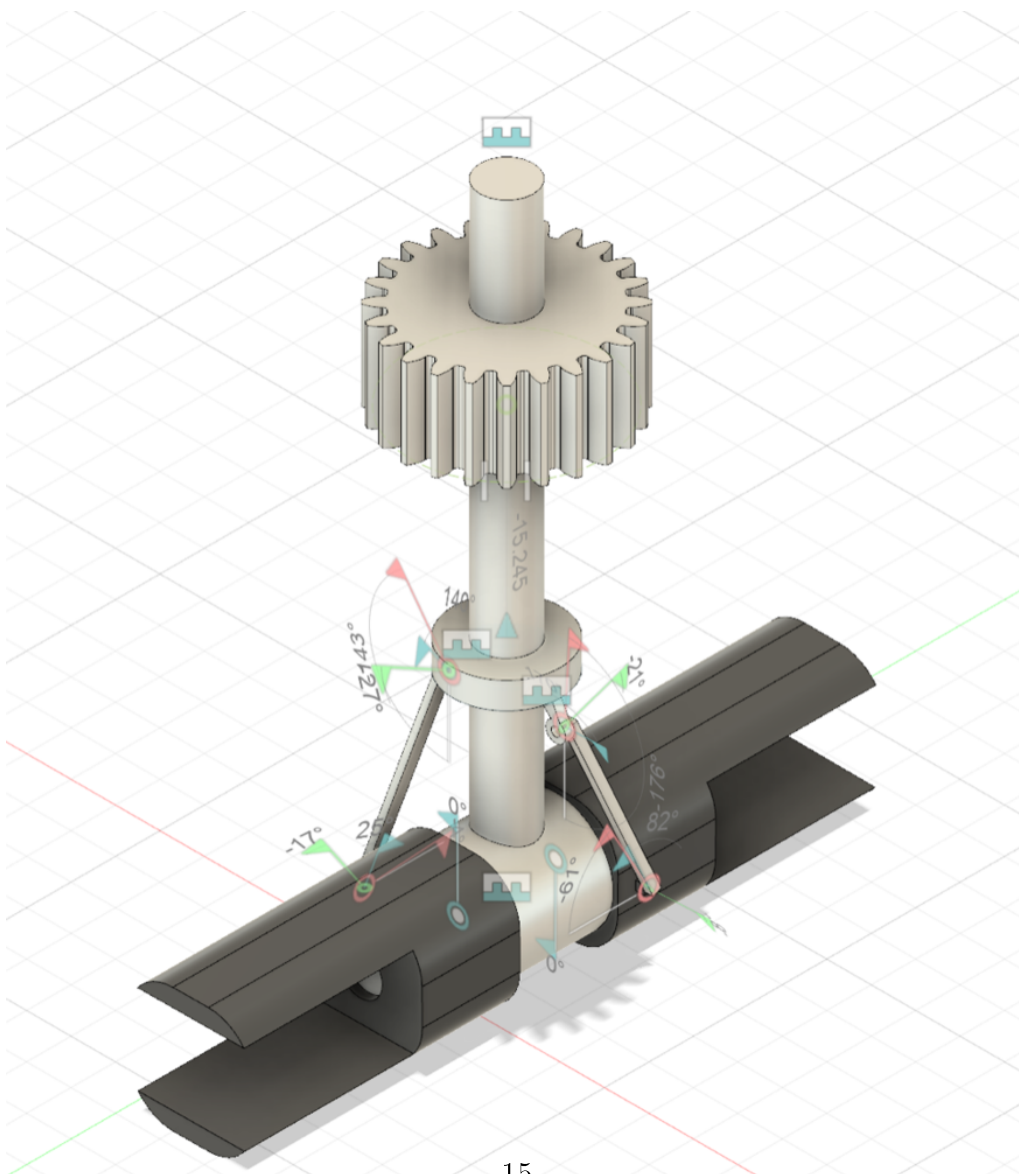


Figura 2.2: Rotore e piattello di coda (ruotato di 90°)

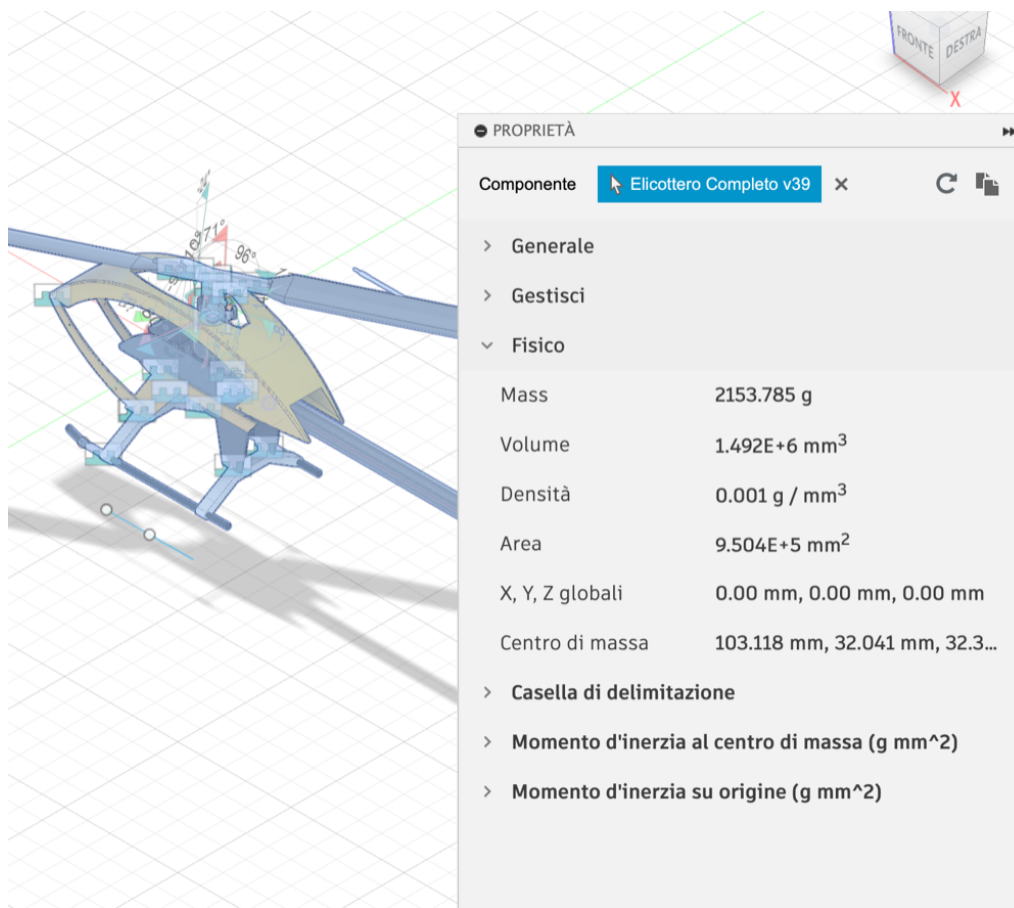


Figura 2.3: Interfaccia caratteristiche fisiche

▼ Momento d'inerzia al centro di massa (g mm ²)	
Ixx	4.427E+07
Ixy	-4.296E+07
Ixz	4.573E+06
Iyx	-4.296E+07
Iyy	2.065E+08
Iyz	-64841.591
Izx	4.573E+06
Izy	-64841.591
Izz	2.062E+08

Figura 2.4: Interfaccia momenti di inerzia

Capitolo 3

Assemblaggio

Terminato il disegno al CAD e lo studio dei momenti di inerzia, ho iniziato la fase di assemblaggio fisico del velivolo ad ala rotante, utilizzando i componenti precedentemente modellati e seguendo scrupolosamente il manuale fornito dal produttore. L'obiettivo era ottenere una configurazione completa e funzionante, pronta ed idonea al volo.

L'assemblaggio ha richiesto un'attenta organizzazione delle fasi di montaggio, partendo dalla struttura portante fino all'integrazione dei sottosistemi elettrici, elettronici e meccanici di controllo. Il telaio è stato montato rispettando le tolleranze e i vincoli previsti, assicurandosi che ogni parte fosse installata correttamente e senza interferenze meccaniche.

Durante questa fase sono stati integrati diversi componenti fondamentali per il funzionamento del velivolo:

- il motore elettrico, montato sull'alloggiamento previsto e collegato alla trasmissione del rotore principale;
- il pacco batterie, fissato nella parte sottostante del velivolo tramite cinghie;
- il Pixhawk, il controllore di volo principale, installato con particolare attenzione all'orientamento;
- il GPS, posizionato con lo stesso orientamento del Pixhawk, in modo da avere una corretta calibrazione;
- la telemetria, che consente di avere i dati del velivolo in tempo reale;
- la radio ricevente, che permette di comunicare con la ricetrasmittente utilizzata dal pilota a terra;

- il cablaggio elettrico, disposto in modo ordinato per facilitarne ispezione e manutenzione;
- i servocomandi, tre per il rotore principale e uno per il rotore di coda, collegati meccanicamente al piattello oscillante per permettere il controllo collettivo e ciclico dei rotori.

Per l'assemblaggio ho utilizzato principalmente brugole e chiavi di precisione, applicando frenafiletti nei punti critici per evitare allentamenti dovuti a vibrazioni. Nei componenti in movimento, come alberi, pulegge e ingranaggi, sono stati impiegati lubrificanti specifici per ridurre attriti e usura, garantendo un funzionamento fluido e costante nel tempo.

Durante l'intero processo, sono stati eseguiti controlli intermedi di qualità, verificando dopo ogni sottogruppo che le parti fossero correttamente montate e che gli accoppiamenti e le tolleranze previste dal manuale fossero rispettati. Sono state inoltre simulate alcune fasi di movimento manuale dei rotori e degli alberi per verificare l'assenza di interferenze e il corretto funzionamento dei giunti meccanici.

La sequenza operativa è stata studiata per ottimizzare tempi e sicurezza: prima il telaio e le strutture portanti, poi la trasmissione principale e secondaria, e infine i sistemi ausiliari e cablaggi. L'organizzazione ha permesso di ridurre al minimo errori, facilitare le verifiche e garantire una maggiore affidabilità del montaggio.

Questa fase ha richiesto un buon grado di manualità, precisione e attenzione al dettaglio, nonché una continua verifica con il manuale per assicurare che ogni passaggio fosse eseguito correttamente. Al termine dell'assemblaggio, il velivolo si presentava in configurazione completa, con tutti i componenti meccanici installati.

Per i componenti elettronici e di controllo, come il Pixhawk, il GPS, la telemetria e la radio ricevente, sono state effettuate valutazioni preliminari sull'alloggiamento, il fissaggio ed il cablaggio. Questi sistemi saranno integrati nella fase successiva, insieme ai test di accensione e di verifica del corretto funzionamento dei servocomandi e del motore elettrico.

In aggiunta, è stata documentata ogni fase del montaggio con fotografie e note, così da avere un riferimento per eventuali interventi di manutenzione, modifiche o aggiornamenti futuri.



(a) Velivolo completo senza pale del rotore principale



(b) Ingrandimento con in primo piano fusoliera e piatto rotore principale



(c) Ingrandimento rotore di coda

Figura 3.1: Fase di assemblaggio del velivolo

Capitolo 4

Integrazione dei sistemi di bordo

L'integrazione dei sistemi di bordo rappresenta una fase cruciale nella realizzazione del velivolo ad ala rotante, in quanto permette di garantire la funzionalità dei sottosistemi elettronici, la comunicazione tra controllore di volo e periferiche, e la gestione sicura della propulsione e dell'energia. In questa fase, tutti i componenti precedentemente assemblati vengono collegati, configurati e testati per assicurare il corretto funzionamento complessivo del velivolo.

4.1 Panoramica dei sistemi di bordo

I principali sistemi integrati a bordo del velivolo sono:

- **Pixhawk 6C**: controllore di volo principale, responsabile della gestione dei sensori, dei servocomandi e del motore. Esegue il firmware di controllo e consente la connessione a software di pianificazione e telemetria (Figura 4.3).
- **Ricevente radio**: permette la comunicazione tra il pilota e il velivolo, trasmettendo i comandi ricevuti dalla radiocomando al Pixhawk (Figura 4.4).
- **ESC (Electronic Speed Controller)**: gestisce la velocità del motore elettrico in base ai comandi ricevuti dal Pixhawk (Figura 4.5).
- **Power Module**: fornisce alimentazione stabile al Pixhawk e ai sensori, monitorando corrente e tensione della batteria (Figura 4.6).
- **Batteria**: fonte principale di energia per il motore e i sistemi di bordo (Figura 4.7).
- **GPS**: fornisce dati di posizione al Pixhawk, fondamentali per la navigazione e per le funzionalità di stabilizzazione automatica (Figura 4.8).

- **Telemetria:** consente il monitoraggio in tempo reale dei parametri del volo e dei sistemi, trasmettendo dati al computer o dispositivo a terra (Figura 4.9).
- **Servocomandi:** tre per il rotore principale e uno per il rotore di coda, collegati meccanicamente al piattello oscillante per permettere il controllo ciclico e collettivo dei rotori (Figura 4.10).

Lo schema di collegamento elettrico dei componenti è riportato in Figura 4.1, evidenziando le connessioni tra Pixhawk, ricevente, ESC, Power Module, batteria, GPS, telemetria e servocomandi.

4.2 Installazione e collegamenti dei componenti

4.2.1 Pixhawk 6C

Il Pixhawk 6C è stato fissato all'interno del telaio mediante supporti antivibrazione, assicurando un orientamento corretto rispetto all'asse longitudinale del velivolo. I collegamenti principali effettuati sono: Power Module, servocomandi, ricevente radio, ESC, GPS e telemetria.

4.2.2 Ricevente radio

La ricevente è stata fissata in posizione centrale per garantire una buona ricezione e ridurre interferenze. Ogni canale della ricevente è stato configurato secondo la funzione corrispondente (rollio, beccheggio, imbardata, collettivo, ecc.) e collegato al Pixhawk tramite cavi PWM o SBUS.

4.2.3 ESC e motore

L'ESC è stato collegato al motore elettrico e al Power Module, tramite connettori e stagnature.

4.2.4 Power Module e batteria

Il Power Module è stato installato vicino alla batteria del velivolo, collegato ad essa e al Pixhawk, consentendo il monitoraggio in tempo reale della tensione e della corrente.

4.2.5 GPS e Telemetria

Il GPS è stato fissato in posizione libera da ostacoli metallici, su di una piastrina stampata 3D. La telemetria è stata collegata al Pixhawk nell'ingresso dedicato, consentendo la trasmissione di dati a Mission Planner durante i test di configurazione e calibrazione.

4.2.6 Servocomandi

I servocomandi sono stati collegati ai canali PWM del Pixhawk e all'albero del piattello oscillante. La corretta corsa e orientamento sono stati impostati successivamente tramite calibratura in Mission Planner.

4.3 Problemi di alloggiamento e soluzioni progettuali

Durante la fase di integrazione dei sistemi di bordo è emersa una problematica legata all'alloggiamento della centralina Pixhawk 6C e del modulo GPS. La disposizione degli elementi strutturali non garantiva infatti uno spazio sufficiente per un fissaggio stabile e corretto di tali dispositivi.

Un montaggio non ottimale avrebbe potuto comportare vibrazioni indesiderate sul Pixhawk, con conseguenti errori nella misura degli accelerometri e dei giroscopi, oltre a possibili interferenze nella ricezione del segnale satellitare da parte del GPS. È quindi stato necessario individuare una soluzione che permettesse di posizionare i due componenti in maniera sicura e funzionale, rispettando al contempo i vincoli geometrici della fusoliera.

La soluzione adottata è stata la progettazione di una piastrina di supporto personalizzata (Figura 4.2), realizzata mediante modellazione CAD 3D. La piastrina è stata disegnata per adattarsi perfettamente alla geometria interna del velivolo, includendo fori e alloggiamenti specifici per la centralina e per il modulo GPS. Successivamente, il componente è stato realizzato tramite stampa 3D in materiale plastico, scelta che ha consentito di ottenere una struttura leggera ma al tempo stesso sufficientemente rigida.

L'installazione della piastrina ha permesso di:

- garantire un fissaggio stabile e sicuro del Pixhawk, riducendo le vibrazioni trasmesse ad esso;
- collocare il GPS in una posizione ottimale per la ricezione del segnale;

- sfruttare al meglio lo spazio disponibile nella parte posteriore della fusoliera senza interferire con altri componenti.

Questa soluzione dimostra come, anche in fase di integrazione di sistemi, possano emergere criticità non prevedibili in fase di progettazione preliminare e come l'utilizzo di un software CAD e la successiva stampa 3D rappresenti uno strumento estremamente utile per risolverle in modo rapido ed efficace.

4.4 Mission Planner: funzionalità principali

Mission Planner è il software di riferimento per la configurazione e la gestione del Pixhawk. Esso consente di:

- **Calibrazione sensori e servocomandi:** permette di calibrare accelerometri, giroscopi, magnetometri, radiocomando ed ESC con procedure guidate.
- **Monitoraggio in tempo reale:** visualizza i parametri di volo (quota, velocità, posizione GPS, orientamento, tensione e corrente) tramite i dati ricevuti dal modulo di telemetria.
- **Pianificazione missioni:** consente di definire waypoint, rotte e modalità di volo automatiche che il velivolo può seguire in maniera autonoma.
- **Gestione parametri avanzati:** permette di modificare valori di controllori, limiti di sicurezza, modalità di volo e altre configurazioni per ottimizzare le prestazioni.
- **Analisi post-volo:** offre strumenti di log e grafici per analizzare le prestazioni del velivolo e verificare eventuali anomalie.

L'utilizzo di Mission Planner si è rivelato fondamentale non solo per l'installazione iniziale del firmware, ma anche per tutte le fasi successive di configurazione, calibrazione e monitoraggio del velivolo.

4.5 Installazione firmware e software

Per il corretto funzionamento del Pixhawk è stato necessario installare il firmware appropriato tramite Mission Planner:

1. Collegamento del Pixhawk tramite cavo USB; Mission Planner rileva automaticamente il dispositivo.

2. Flashing del firmware per elicottero ad ala rotante tramite Mission Planner. “Flashing” significa sovrascrivere il firmware esistente con una versione nuova o specifica (ad esempio, il firmware per elicotteri, ovvero velivoli ad ala rotante).
3. Verifica della corretta installazione del firmware e del rilevamento dei sensori integrati.

4.6 Calibrazioni e configurazioni

Dopo l’installazione del firmware, sono state effettuate le seguenti procedure di calibrazione:

- Calibrazione accelerometri, giroscopi e magnetometro. Ho dovuto fare una vera e propria calibrazione guidata attraverso Mission Planner degli accelerometri all’interno del Pixhawk ruotandolo in ogni direzione e attorno ai suoi tre assi: beccheggio, rollio ed imbardata. Per la calibrazione del GPS l’ho dovuto posizionare sulla piastrina che ho realizzato al CAD e poi stampata in 3D, in modo che fosse solidale al Pixhawk ed ad una distanza adeguata da esso.
- Calibrazione dei servocomandi, impostando gli estremi di corsa. Attraverso Mission Planner e attraverso il radiocomando già collegato ho calibrato i servocomandi facendo sì che il piattello del rotore principale fosse esattamente orizzontale quando le barre del radiocomando sono in posizione neutra. Per una maggiore precisione sono ricorso all’opzione di trim di Mission Planner in modo da fare micro correzioni per raggiungere un risultato ottimale.
- Calibrazione del radiocomando. Collegandolo alla ricevente e sempre attraverso Mission Planner questa calibrazione avviene portando tutte le barre e gli interruttori del radiocomando nelle posizioni di completa escursione in ogni direzione. In questo modo avviene una calibrazione ottimale di beccheggio, rollio ed imbardata, e di tutti gli interruttori associati ad altre funzioni utili per il volo.
- Configurazione ESC e test di avvio motore. Viene fatto girare il motore elettrico del velivolo in modo da eseguire una calibrazione dell’esc ottimale.
- Impostazione parametri di sicurezza.

4.7 Verifica finale dei sistemi di bordo

Al termine delle calibrazioni, sono stati eseguiti test completi di accensione, verifica dei servocomandi, rotazione del motore a bassa velocità e comunicazione GPS/telemetria tramite Mission Planner. Solo dopo aver verificato il corretto funzionamento di tutti i sottosistemi, il velivolo è stato considerato pronto per la fase di prove di volo.

Figure del Capitolo 4

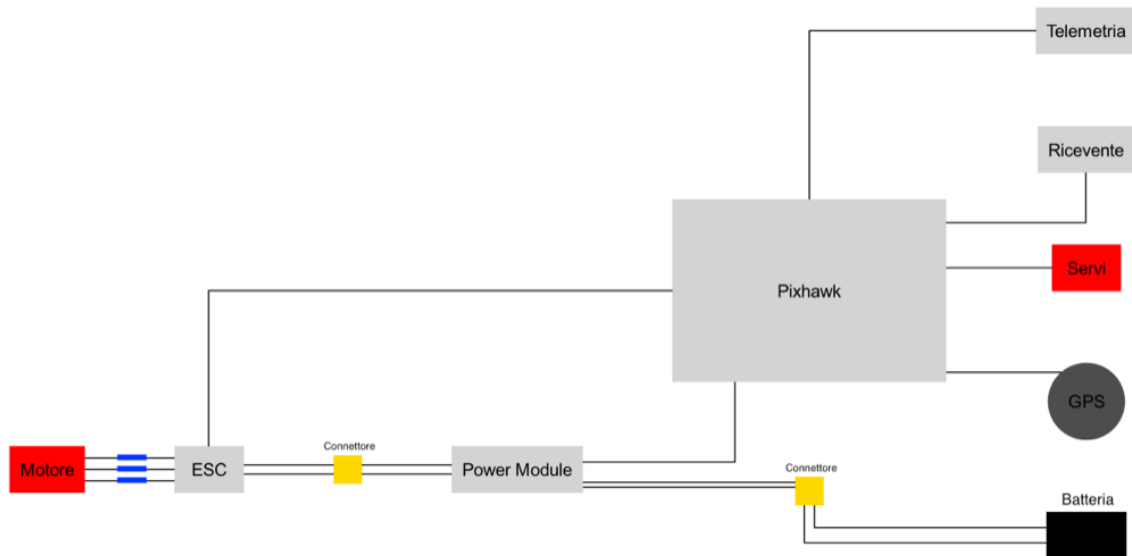


Figura 4.1: Schema elettrico di integrazione dei sistemi di bordo.

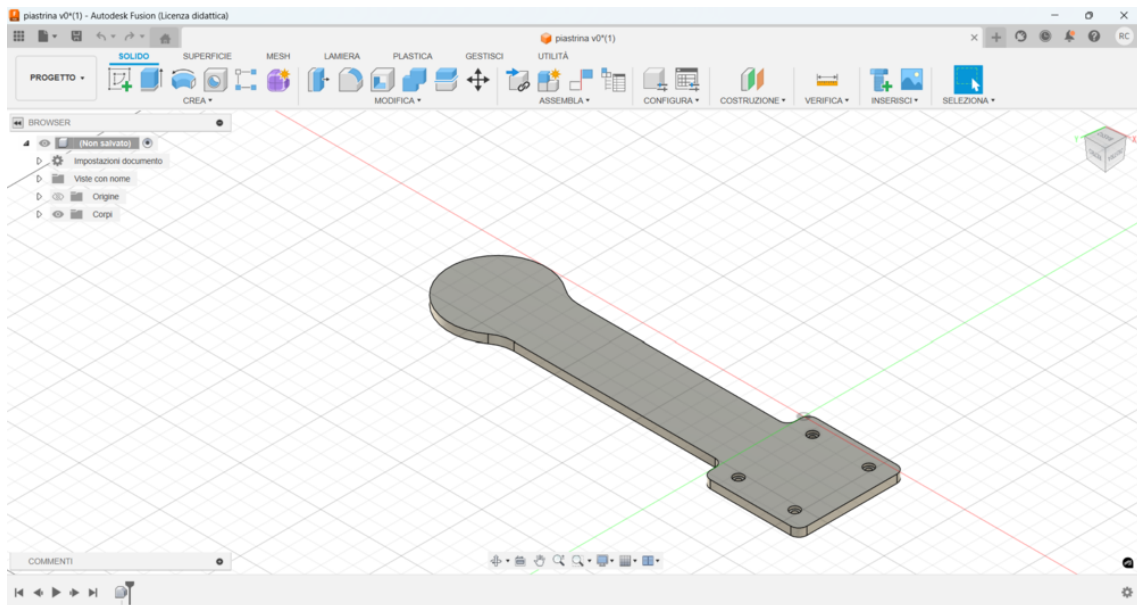


Figura 4.2: Piastrina realizzata per alloggiamento Pixhawk e GPS



Figura 4.3: Pixhawk 6C fissato al telaio con supporti antivibrazione.

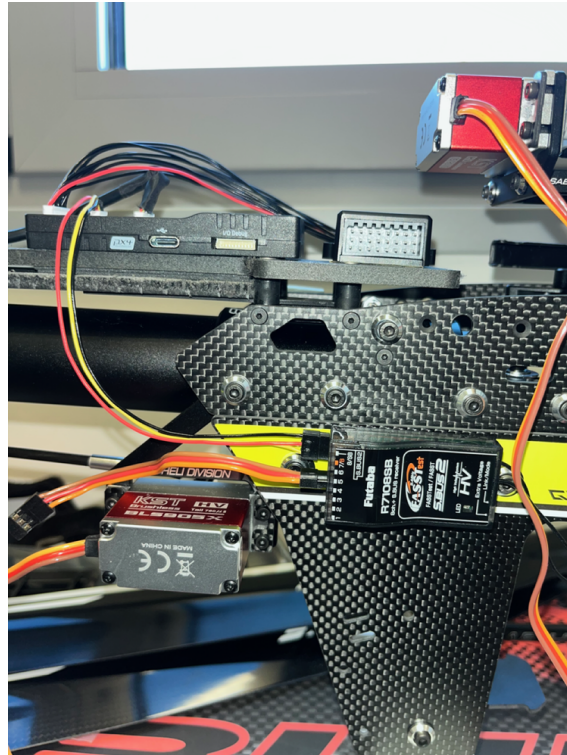


Figura 4.4: Ricevente radio collegata al Pixhawk tramite SBUS/PWM.

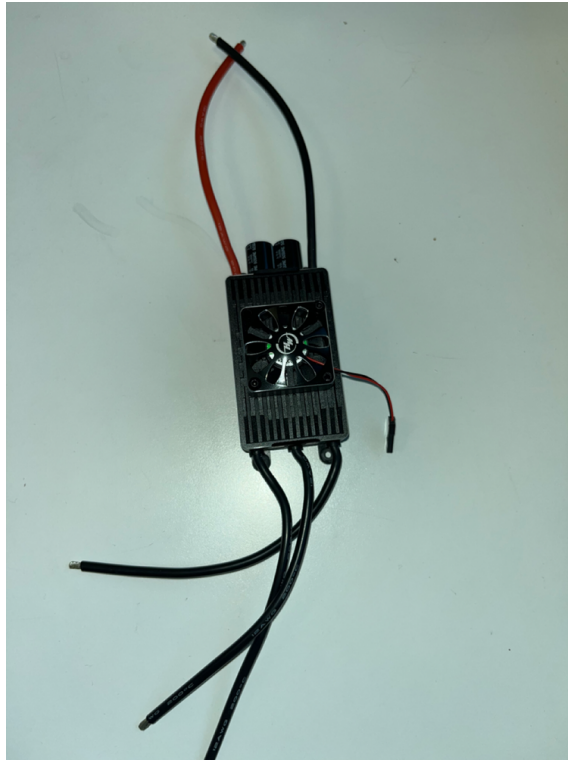


Figura 4.5: ESC (Electronic Speed Controller)

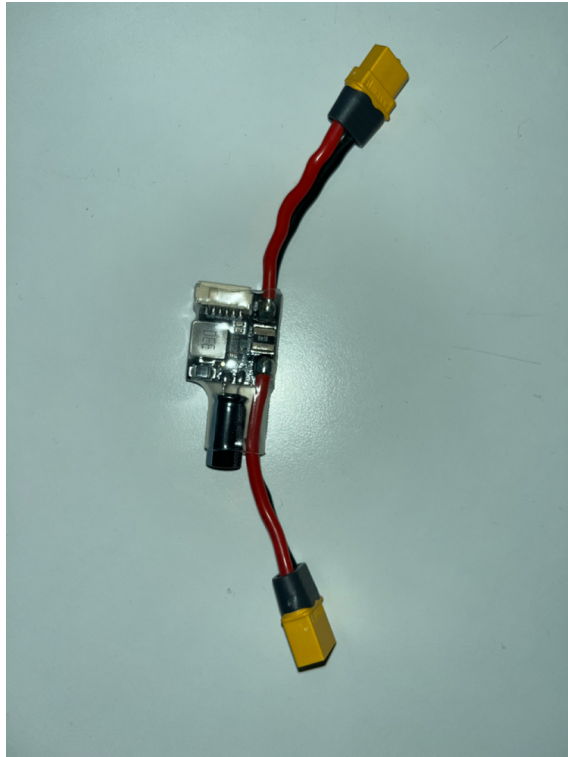


Figura 4.6: Power Module.

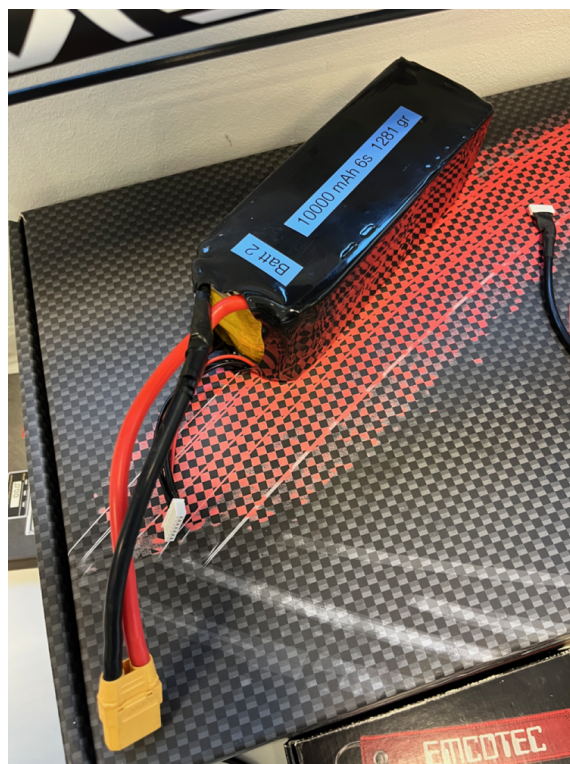


Figura 4.7: Batteria principale del velivolo.



Figura 4.8: GPS fissato sulla piastrina.



Figura 4.9: Modulo di telemetria.



Figura 4.10: Servocomandi collegati al piattello oscillante.

Capitolo 5

Previsioni su prove di volo e validazione sperimentale

In assenza di prove sperimentali effettive, questo capitolo si concentra sulle previsioni teoriche relative al comportamento del velivolo ad ala rotante durante le operazioni di volo. L'obiettivo è delineare le aspettative riguardo le prestazioni, la stabilità e la risposta dei sistemi di bordo, fornendo una base per future verifiche sperimentali.

5.1 Obiettivi delle previsioni

Le previsioni sulle prove di volo mirano a stimare:

- **Prestazioni aerodinamiche:** valutare la capacità del velivolo di generare portanza sufficiente per il decollo e il mantenimento dell'assetto, nonché la stabilità durante manovre di rollio, beccheggio, imbardata e hovering.
- **Risposta dei sistemi di controllo:** prevedere come i servocomandi e il controllore di volo reagiranno agli input teorici del pilota e agli effetti delle perturbazioni esterne, come vento o turbolenza.
- **Efficienza energetica:** stimare il consumo energetico del motore e la durata della batteria in base alle condizioni operative previste.
- **Interazioni tra sottosistemi:** analizzare l'interazione tra Pixhawk, servocomandi, ESC, telemetria e GPS, evidenziando eventuali criticità o limiti potenziali.

5.2 Analisi previsionali

Sulla base dei dati tecnici dei componenti utilizzati e dei modelli matematici della dinamica del velivolo, è possibile effettuare alcune considerazioni:

- Il velivolo dovrebbe essere in grado di mantenere un hover stabile grazie alla disposizione e calibrazione dei tre servocomandi principali e di quello del rotore di coda, che assicurano il controllo ciclico e collettivo dei rotori.
- I valori dei parametri PID impostati nel Pixhawk sono teoricamente sufficienti per garantire reazioni proporzionate agli input del pilota e per attenuare oscillazioni indesiderate, anche in presenza di perturbazioni esterne.
- Il Power Module e la batteria dovrebbero fornire energia stabile per voli di breve durata, considerando il consumo del motore e dei sistemi elettronici di bordo. È possibile stimare una durata approssimativa basata sui valori nominali di corrente e tensione dei componenti.
- La telemetria e il GPS consentiranno un monitoraggio in tempo reale dei parametri principali, permettendo di verificare quota e velocità e la posizione del velivolo durante il volo.

5.3 Possibili criticità e raccomandazioni

Anche se le previsioni sono positive, è importante considerare alcune potenziali criticità:

- Vibrazioni trasmesse alla centralina Pixhawk e al GPS, che potrebbero alterare le misure degli accelerometri e dei giroscopi.
- Rischio di interferenze tra componenti elettronici o segnali radio, che potrebbe influire sulla precisione del controllo.
- Limiti energetici dovuti alla capacità della batteria, che potrebbero ridurre la durata massima del volo rispetto a quanto teoricamente previsto.

Mitigazione dei rischi

- Verificare la stabilità meccanica dei supporti di Pixhawk e GPS, limitando le vibrazioni trasmesse.

- Assicurarsi di un corretto posizionamento dei componenti elettronici e dell'antenna di telemetria per ridurre interferenze.
- Monitorare attentamente i parametri di volo e la tensione della batteria, anche durante simulazioni o test preliminari su banchi di prova.

5.4 Conclusioni previsionali

Sebbene i voli non siano stati effettuati, l'analisi teorica consente di stimare che il velivolo potrebbe raggiungere un comportamento stabile e controllabile, con prestazioni coerenti con le specifiche dei componenti scelti. Questo approccio fornisce una guida utile per future prove sperimentali e rappresenta una base solida per eventuali ottimizzazioni dei parametri di controllo e della configurazione dei sistemi di bordo.

Conclusioni

La presente tesi ha affrontato lo studio, la progettazione, l'assemblaggio e la validazione sperimentale di un velivolo ad ala rotante, seguendo un approccio integrato che ha combinato modellazione CAD, analisi dei momenti di inerzia, integrazione dei sistemi di bordo e prove di volo. L'obiettivo principale era ottenere una comprensione approfondita del comportamento dinamico e strutturale del velivolo, garantendo coerenza tra progetto, costruzione e prestazioni effettive.

Nel Capitolo 1 (*Contesto generale*) sono state presentate le principali considerazioni progettuali, tra cui stabilità, distribuzione delle masse e scelta dei componenti elettronici e meccanici. Questo capitolo ha fornito le basi concettuali necessarie per guidare le successive fasi di progettazione, assemblaggio e simulazione, evidenziando tutti i passaggi da affrontare per la finalizzazione del progetto.

Il Capitolo 2 (*Progettazione CAD 3D e analisi dei momenti di inerzia*) ha illustrato la modellazione tridimensionale del velivolo e l'analisi dei momenti di inerzia tramite software CAD (Fusion 360). I risultati hanno confermato che l'inerzia attorno all'asse longitudinale è inferiore rispetto agli assi trasversale e verticale, in linea con la geometria allungata della fusoliera. L'analisi dei prodotti d'inerzia ha evidenziato leggere asimmetrie nella distribuzione delle masse dovute alla disposizione dei componenti interni, sebbene trascurabili rispetto alla simmetria complessiva del velivolo. Questi dati hanno costituito un riferimento quantitativo per la comprensione della dinamica del rollio, del beccheggio e dell'imbardata.

Nel Capitolo 3 (*Assemblaggio*) sono state descritte le fasi di costruzione del velivolo, facendo riferimento in modo accurato al manuale di assemblaggio fornito dal produttore del velivolo. L'assemblaggio ha permesso di identificare e risolvere problemi di interferenze meccaniche e di predisporre correttamente tutti i collegamenti necessari, garantendo che la struttura fosse robusta e ben assemblata.

Il Capitolo 4 (*Integrazione dei sistemi di bordo*) ha affrontato l'installazione e il collegamento dei principali dispositivi elettronici, tra cui Pixhawk 6C, ricevente radio, ESC e motore elettrico, Power Module e batteria, GPS, telemetria e servo-comandi. La corretta integrazione di questi sistemi è stata verificata mediante test

preliminari, calibrazioni e controlli di funzionalità. Questa fase ha garantito che il velivolo fosse pronto per le successive prove di volo, minimizzando possibili errori dovuti a connessioni errate o incompatibilità dei componenti.

Infine, il Capitolo 5 (*Previsioni su prove di volo e validazione sperimentale*) ha riportato delle previsioni sui possibili risultati delle future missioni di volo. Le osservazioni teoriche indicano una buona stabilità del velivolo e una coerenza attesa tra i dati analitici e le prestazioni previste, suggerendo una risposta dinamica favorevole lungo tutti gli assi principali. In particolare, si prevede che le future prove potranno confermare le stime ottenute dall'analisi dei momenti di inerzia e dalla distribuzione delle masse, evidenziando la correttezza dell'assemblaggio e dell'integrazione dei sistemi.

In sintesi, i principali risultati ottenuti includono:

- conferma della coerenza tra modello CAD e prototipo reale;
- analisi dei momenti di inerzia e individuazione di asimmetrie interne trascurabili;
- integrazione completa e funzionante dei sistemi di bordo;
- previsioni su validazione sperimentale della stabilità e della risposta dinamica del velivolo.

La metodologia seguita, che ha integrato modellazione digitale, analisi numerica e sperimentazione reale, ha permesso di ottenere un quadro completo e affidabile del comportamento del velivolo. Questo approccio multidisciplinare è risultato fondamentale per identificare criticità progettuali, ottimizzare la disposizione dei componenti e garantire la robustezza della struttura.

Per quanto riguarda sviluppi futuri, il lavoro svolto offre diverse possibilità:

- ottimizzazione strutturale di alcune piastrine utilizzate per l'alloggio di componenti elettronici;
- approfondimenti sulla dinamica di volo mediante simulazioni avanzate e modellazione dei controlli;
- implementazione di sensori aggiuntivi per monitoraggio in tempo reale delle condizioni operative;
- aggiunta di un Safty Power Module per una maggiore sicurezza durante le fasi di volo del velivolo.

In conclusione, la tesi ha raggiunto gli obiettivi prefissati, fornendo una valutazione completa delle caratteristiche strutturali, meccaniche ed elettroniche del velivolo, nonché della sua risposta dinamica in condizioni operative reali. I risultati ottenuti rappresentano un contributo concreto alla comprensione del comportamento del velivolo ad ala rotante e costituiscono una solida base per futuri studi e sviluppi nel campo dell'ingegneria aerospaziale.

Bibliografia

In questo capitolo vengono riportate le principali fonti e riferimenti utilizzati per la redazione di questa tesi. Sono incluse opere di riferimento su meccanica del volo, strutture aeronautiche e documentazione dei sistemi autopilota open source. Le fonti sono state selezionate per la loro rilevanza scientifica e la completezza dei contenuti, al fine di garantire una base solida per le analisi e gli approfondimenti discussi nei capitoli precedenti.

- Casarosa, Carlo. *Meccanica del volo*. Pisa: Pisa University Press, 2014.
- Johannes Wild, *Fusion 360 / Passo dopo passo: Progettazione CAD, simulazione FEM e CAM per principianti. La guida completa per Autodesk's Fusion 360*, Independently published, 2021.
- Megson, T.H.G. *Aircraft Structures for Engineering Students*. London: Arnold, 1999.
- Manuale di assemblaggio velivolo: GOBLIN RAW Manuale PDF.
- ArduPilot. Open Source Autopilot. Disponibile online: <https://ardupilot.org/>.
- ArduCopter Documentation. Disponibile online: <https://ardupilot.org/copter/>.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare in primo luogo l'Università di Bologna, il laboratorio di Meccanica del Volo ed il Professor Fabrizio Giulietti per aver reso possibile la realizzazione di questo progetto e di questa tesi di laurea in Ingegneria Aerospaziale.

Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia, che mi ha sostenuto in ogni fase della mia vita accademica e personale. In particolare desidero menzionare mia madre Maria Costanza, mio padre Massimiliano per la loro pazienza e il loro costante incoraggiamento; i miei nonni, Bruna, Silvio e Carlo, per l'affetto che mi hanno trasmesso; voglio ringraziare anche Gianni, che pur non parlando di università è riuscito a darmi un grande supporto: tra una giornata in campagna e una chiacchierata, mi ha insegnato che anche il tempo passato a fare altro è prezioso; infine le mie due sorelline, Giorgia e Marta, (anche se ormai tanto piccole non sono più), che sono riuscite a farmi sorridere anche nei momenti più tesi e difficili. Il supporto di tutti loro è stato fondamentale per superare al meglio le sfide incontrate lungo questo percorso. Ringrazio anche gli altri membri della mia famiglia, la cui presenza e il cui sostegno, pur non citati individualmente, hanno contribuito in maniera significativa nel mio percorso.

Voglio inoltre ringraziare tutti i miei amici al di fuori dell'università, che mi sono stati sempre vicini, condividendo momenti di svago, conforto e motivazione. La loro amicizia ha creato un equilibrio tra studio e vita personale, permettendomi di affrontare lo stress e le sfide con maggiore leggerezza e serenità. Un ringraziamento particolare va a Riccardo e Mattia, che con la loro presenza, la loro ironia e il loro sostegno sincero hanno contribuito a rendere questo percorso più sereno e piacevole.

Infine ci sono loro, Ardro, Carlo, Ciccio e Gas, quelle persone che non immagineresti mai di incontrare iniziando l'università. La loro compagnia, i consigli, le discussioni stimolanti e i momenti di condivisione di gioie e difficoltà hanno reso l'esperienza universitaria unica e indimenticabile. È anche grazie a loro se sono riuscito a raggiungere questo traguardo. La loro presenza ha reso più leggere le giornate impegnative e ha permesso di trasformare le sfide in occasioni di crescita, rendendo ogni risultato ancora più significativo.

A tutte queste persone va il mio più sincero ringraziamento: senza il loro supporto, la loro guida e la loro amicizia, questo percorso non sarebbe stato lo stesso e il raggiungimento di questo importante traguardo non avrebbe avuto lo stesso valore.