



UNIVERSITÀ DI PISA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA AERONAUTICA

Tesi di Laurea

PROGETTO E REALIZZAZIONE DI UN MINI AERIAL VEHICLE  
A CONTROLLO SEMI-AUTOMATICO PER MONITORAGGIO  
AMBIENTALE

RELATORI

Prof. Ing. Roberto GALATOLO

Prof. Ing. Carlo CASAROSA

Prof. Ing. Giovanni MENGALI

Ing. Alessandro A.QUARTA

Ing. Renzo D'AMATO

CANDIDATO

Marco DEL DOTTO

ANNO ACCADEMICO 2010-2011



*Ai miei genitori,  
che hanno reso possibile un sogno.*

*A me stesso,  
che l'ho realizzato.*



# Ringraziamenti

“... Non vogliate negar l'esperienza  
di retro al sol, del mondo senza gente.  
Considerate la vostra semenza  
fatti non foste a viver come bruti  
ma per seguir virtute e canoscenza”

*(Dante Alighieri, Divina Commedia, Inferno canto XXVI, 116-120)*

Ed eccomi qui, a scrivere la “mitica” pagina dei ringraziamenti: la prima pagina che si legge in questa tesi è l'ultima ad essere scritta. . . proprio per questo motivo la sua stesura regala soddisfazione, perché vuol dire che è finita davvero! Parlare della mia esperienza universitaria sarebbe lungo e complesso, so soltanto che sono entrato a ingegneria in un modo e ne sono uscito in un altro, non solo come cultura ma soprattutto come persona.

Ripercorro mentalmente la lunga strada che ha caratterizzato la mia vita da un po' di tempo a questa parte e rivedo le tantissime persone che ho avuto modo di conoscere, alcune delle quali meritano di essere menzionate per l'amicizia che ne è nata, per l'aiuto che mi hanno dato, per le risate e i momenti belli che mi hanno fatto vivere, e, credetemi, ce n'è davvero stato bisogno.

Un ringraziamento agli amici con cui ho iniziato quest'avventura universitaria, in particolare Mario Zaccagna: ne abbiamo passate io e te di avventure, a cominciare da quando, sedicenni, andavamo all'ITI. Quante mattine passate in treno a parlare di tutto, degli impegni scolastici presi con “filosofia” e non solo, a fare a lotta col Galli sul treno, ad andare in giro in mountain bike, alle gite fatte alle manifestazioni aeree. Parlare di tutto quello che abbiamo condiviso occuperebbe probabilmente un capitolo di questa tesi, per me sei un Amico, grazie di tutto.

Come non ricordare poi gli altri ragazzi, Alessandro Pelagotti, Simone Fenili, Luigi Giammattei, Serena Fanucchi, con voi ho trascorso ore liete nella famosissima ed esclusiva “piccionaia”, luogo elitario che eleggemmo a nostra stabile dimora nelle soffitte del biennio d'ingegneria.

Luca Paci: un mito. Ci siamo conosciuti per caso, anzi, mi ha conosciuto non per caso in aula studio, quando, vedendo che nella copertina di un quaderno

avevo messo un'immagine di un famoso robot dei cartoni, mi disse: «ma sei appassionato anche tu di Gundam?» Da lì è nata un'amicizia che si protrae già da qualche anno; lui ormai è diventato un superesperto di fisica Minovski e prima o poi sono sicuro che me lo vedò arrivare a casa dall'alto con un *Core Fighter* dicendo: «L'ho costruitooo, l'ho costruitooo»!

Indiscrezioni lo danno prossimo all'investitura di "Re(i)" del LuccaComics con assegnazione della cittadinanza lucchese per meriti sul campo come "cosplayer". Luca, ti ringrazio per le ore liete passate ad ingegneria con un bel fragoroso e baritonale: Opaciiiiiii!!!!

Rodolfo. Che dire di questa persona. Hai tutta la mia stima, sei una persona di cuore che in nessun momento mi ha fatto mancare l'appoggio che solo un vero amico sa dare. Nei momenti difficili passati per questioni sentimentali, ci siamo, a turno, confortati vicendevolmente e di questo te ne sarò sempre grato. Per le tue telefonate, per sentire solo cosa stessi facendo o a che punto fosse il lavoro di tesi, per aver dimostrato amicizia anche in questo. Ti auguro ogni bene possibile nella vita.

Laura. Con te ho seguito tutto il corso di Controlli Automatici e studiato Scienza delle Costruzioni, grazie per avermi fatto passare il più bel periodo di studi qui a ingegneria, per le mille battute, per la musica anni '80 ascoltata al Duomo di Pisa nelle pause pranzo, per i cioccolatini che mi portavi la mattina in aula studio.

Cinzia. Della nostra amicizia ne faccio tesoro, difficile trovare una persona come te in giro, ti sei sempre dimostrata attenta ad ascoltarmi anche nei periodi bui, mi chiamavi addirittura tu quando ero a corto di credito (cioè sempre) ed anche se mi hai fatto respirare un bel po' di fumo passivo per il progetto di Costruzione di Macchine, il periodo passato insieme lo ricorderò per sempre. Grazie per avermi invitato da te quei famosi cinque giorni, li ricorderò per tutta la vita.

Ringrazio gli amici "del laboratorio accanto" Gabriele & co., per le mille chiacchierate fatte, per l'amicizia che anche loro hanno saputo regalarmi; ringrazio Massimo Bernardini: persona squisita e sempre disponibile, anche tu hai tutta la mia stima. Ringrazio Nicola Chiumiento e Giorgio Gasparroni per le mille risate che mi hanno fatto fare e per la compagnia sui campi di volo. Grazie anche ad Andrea Teani, saresti stato un invitato speciale alla mia festa, ma il destino ha deciso diversamente. Grazie a Emanuele Giannotti per l'amicizia e l'opportunità

che mi ha offerto e Maurizio Saracco per l'insostituibile aiuto che mi ha dato con la fresa CNC, per la realizzazione della fusoliera del "drone".

Ringrazio il professor Casarosa, il quale è stato in costante e paziente attesa dei miei progressi con la costruzione del MiniUAV: assieme abbiamo condiviso momenti di euforia e di soddisfazione per aver visto "quell'aggeggiamento" finalmente sollevarsi da terra, grazie per aver creduto in me. Ringrazio Renzo, infaticabile "intrattenitore" del gruppo: nel momento in cui lo si vedrà triste dovremo preoccuparci davvero, vista la sua nota capacità di non abbattersi mai! Ringrazio il professor Galatolo, un Signore, la sua disponibilità proverbiale dovrebbe essere d'esempio a molti, da lui ho imparato tantissimo. Il professor Mengali, persona molto competente, lo ringrazio per i tanti consigli che mi ha dato anche dal punto di vista "umano", grazie anche a Francesco Schettini per la compagnia e l'apporto che ha dato nella fase delle prove di volo.

Alessandro Quarta. A te devo tutto questo lavoro di tesi. Sei stato tu a propormi questo lavoro, a darmi l'opportunità di poter coniugare l'hobby del modellismo con gli studi, sei stato tu a tirarmi fuori da alcune rogne e sei stato ancora tu a capirmi e ad ascoltarmi nei momenti di confidenza. Hai tutta la mia stima e anche di più, meriti il raggiungimento di tutti gli obiettivi ai quali aspiri. Sei un Amico.

Ringrazio la mia famiglia. . . **Mamma!**. . . **Papà!**. . . Tutto questo non sarebbe mai potuto avvenire senza il vostro supporto incondizionato, siete i genitori perfetti. Vi chiedo scusa se sono riuscito a fare solo casino ritardando questo momento di gioia, il senso di colpa che provo non sarà mai sanato. Siete stati eccezionali nel non farmi sentire mai "in ritardo" non facendomi mancare niente e rendendo questo periodo più affrontabile. Le parole sono riduttive e non vorrei scendere nel banale, vi dico. . . GRAZIE!

Dora: la mia sorellina, grazie anche a te che con me hai aspettato che questo momento si realizzasse davvero, anche senza di te non ce l'avrei mai fatta; sei stata, sei e sarai la mia spalla: GRAZIE! Grazie anche a Gabriele. A Giada, Arianna e Giacomo un ringraziamento per aver allietato le mie ore di studio con le "visitine" a vedere lo zio che "faceva il compito"!!!

Grazie a tutti i miei familiari, lo zio Francesco, la zia Giovanna, non mi hanno fatto mai mancare il loro affetto e sostegno, Annalisa e Daniele, lo zio Fabio; Antonella, Salvo, Martina, grazie a tutti. Ringrazio lo zio Erno, che non mi ha

fatto mai mancare il suo bene in questo lungo e difficile periodo. Grazie a chi mi ha voluto bene e ora non c'è più: tutti i miei nonni, sono sicuro che mi avete aiutato ad andare avanti.

Ringrazio tutti quelli che mi sono scordato di mettere in questa lista ma che hanno creduto in me; ringrazio anche le persone che mi hanno ostacolato o deriso: mi avete fatto vedere come non diventare MAI. Quando meno me l'aspettavo sei arrivata. E pensare che quella sera manco ci dovevamo conoscere. Di chi parlo? Parlo della persona che forse più di tutte ha saputo capirmi nei momenti più bui, della persona di cuore che mi è stata sempre vicino, di quella mi ha "sopportato" nelle lunghe telefonate di quando ero sotto esame... della persona che non esiterebbe a fare qualsiasi cosa per me. Mi hai fatto sentire importante, compreso, stimato, sei la mia seconda anima e senza di te la vita si ridurrebbe ad una cupa, arida esistenza in bianco e nero. Ringraziarti è poco e spero che questo sia il modo migliore per farlo: hai davanti a te la mia tesi di laurea, è un po' anche la tua festa, la Nostra festa no? Ti voglio bene, Egle.

In ultimo: grazie Marco, grazie davvero, questa laurea solo tu sai quanto l'hai voluta, solo tu non hai MAI pensato di abbandonare gli studi ma hai SEMPRE creduto, in ogni secondo che hai vissuto, di poter portare a termine quello che avevi iniziato. Ce l'hai fatta, HAI VINTO.

*Marco Del Dotto*





# Sommario

Il presente lavoro di tesi costituisce la tappa d'inizio del *Progetto SiMonA* (*Sistema di Monitoraggio Ambientale*). Tale progetto, che il Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale dell'Università di Pisa ha avviato con il finanziamento erogato dalla Fondazione Cassa di Risparmio di Pisa, ha come obiettivo lo sviluppo di un sistema di monitoraggio ambientale basato sull'impiego di una piattaforma di volo **UAV** di classe Mini.

Lo studio e le attività presentate nel seguito, fatte salve le attività di analisi aerodinamica **CFD** e la sintesi del sistema di controllo che sono oggetto di altri lavori di tesi, coprono l'intero sviluppo del progetto. Esse riguardano la concezione, lo sviluppo, la realizzazione materiale e la fase di test in volo del prototipo dimostratore di fattibilità.

Lo studio è servito a identificare una configurazione di volo idonea al soddisfacimento delle specifiche di progetto emanate a livello europeo col varo del programma **GMES**. Le attività hanno riguardato in maniera preponderante la realizzazione pratica del prototipo, la caratterizzazione del sistema propulsivo e la condotta dei test di volo. la configurazione proposta è in grado di effettuare volo in *hovering* e volo traslato.



# Organizzazione della tesi

Questa relazione è organizzata in tre parti. Nella parte I si affronta il progetto concettuale del velivolo, con la concezione di un'architettura preliminare capace di soddisfare le specifiche, il suo successivo affinamento e l'approvazione del layout tramite studi di convalidazione aerodinamica; si concepisce, inoltre, uno schema per l'elettronica *Fly By Wire* di controllo e l'analisi del sistema propulsivo del velivolo. La parte II riguarda il progetto di dettaglio della cellula strutturale e di tutte le parti che la costituiscono, lo studio dell'elettronica a bordo destinata al controllo del volo, la scelta e caratterizzazione della propulsione fino ad arrivare al trittico dimensionato; segue la parte di realizzazione materiale del prototipo, mettendo in evidenza i metodi usati e le tecniche di realizzazione. La parte III illustra i risultati ottenuti con le prove in volo del velivolo. Nel capitolo 1, si introducono i sistemi "unmanned", ripercorrendo brevemente le principali tappe storiche dell'evoluzione di questi velivoli, classificandoli in base alle loro dimensioni e prestazioni e descrivendo i loro impieghi sia nel campo militare che civile. Si descrive in dettaglio lo scenario nel quale operano gli UAV nel campo civile e il varo del programma GMES. Sono presentate le linee guida del progetto illustrando come il velivolo oggetto di questa tesi intende inserirsi in questo contesto, presentando il sistema UAS e delineando infine gli scopi e gli obiettivi del mio lavoro. Nel capitolo 2 si introduce il sistema UAS nella sua globalità, descrivendo la funzione della stazione a terra, del sistema di radiocomando, del sistema telecamera/occhiali, della piattaforma di volo e dell'elettronica di bordo. Nel capitolo 3 si affronta il progetto concettuale del velivolo, partendo da una bozza preliminare in grado di soddisfare le specifiche per arrivare alla scelta di un layout di primo tentativo da scegliere con studi di convalidazione aerodinamica, in questo contesto sarà effettuata una scelta del tipo di propulsione idonea e un primo schema dell'elettronica di bordo. Nel capitolo 4 si affronta il tema della propulsione con una breve introduzione alla fisica dei motori elettrici brushless seguita dal dimensionamento dei motori da utilizzare e dalla scelta del tipo di batterie da impiegare a bordo. Nel capitolo 5 si prende in considerazione la definizione dell'elettronica *Fly By Wire* di controllo a livello concettuale. Nel capitolo 6 si affronta il progetto

di dettaglio della cellula strutturale, a cominciare dal disegno di tutto il velivolo e dei particolari e tenendo in considerazione requisiti di natura aerodinamica (profili, punti neutri), meccanica (baricentro, movimento superfici mobili) e gli ingombri dei componenti di bordo (alloggiamenti). Nel capitolo 7 si affronta il progetto di dettaglio dell'elettronica, definendo le caratteristiche del processore (possibilità di ricevere modelli compilati), del sistema  $Tx-Rx$  e dei servo-attuatori, prevedendo, tramite i disegni 3d, i vari alloggiamenti. Nel capitolo 8 si affronta il progetto di dettaglio dell'apparato propulsivo, intendendo con ciò sia l'apparato propulsivo in senso stretto, sia l'apparato di sostentamento in *hovering*, la scelta dei regolatori e delle eliche. Nel capitolo 9 saranno presentati i risultati del progetto di dettaglio con il trittico definitivo e dimensionato del velivolo. Nel capitolo 10 sono presentati i risultati della campagna di prove preliminari vincolate (*tethered*). Nel capitolo 11 sono presentati i risultati della campagna di prove di volo libero in *hovering*. Nell'appendice A si riportano le proprietà inerziali di alcune parti del velivolo. Nell'appendice B si riportano alcuni risultati in forma grafica dell'analisi fluidodinamica CFD. Nell'appendice C si riporta la sequenza delle operazioni per il trasferimento dell'FMS sul DSP a bordo del velivolo.

# INDICE

<b>I</b>	<b>Progetto concettuale del MAV</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE AI VELIVOLI UAV</b>	<b>2</b>
1.1	Generalità	2
1.2	La storia	4
1.2.1	I pionieri	4
1.2.2	Un nuovo impulso	5
1.2.3	Lo stato attuale e futuro	9
1.3	Classificazione	12
1.4	Impieghi	14
1.5	Lo scenario civile	18
1.6	Linee guida del progetto	20
<b>2</b>	<b>ARCHITETTURA GENERALE DI TUTTO IL SISTEMA</b>	<b>22</b>
2.1	Piattaforma di volo	23
2.2	Elettronica di bordo	23
2.3	Video-link	24
2.4	Stazione a terra	24
2.4.1	Trasmettitore per il controllo del velivolo	24
2.4.2	Ricevitore per l'acquisizione delle immagini	26
2.4.3	Visore per la presentazione delle immagini al pilota	26
2.4.4	Sistema di registrazione delle immagini	27
<b>3</b>	<b>PIATTAFORMA DI VOLO</b>	<b>28</b>
3.1	Concezione dell'architettura	29
3.1.1	Impostazione del progetto	29
3.1.2	Bozza concettuale	31
3.2	Controllo del velivolo.	34
3.3	Modello matematico del velivolo	40

## Indice

3.3.1	Le equazioni delle forze	40
3.3.2	Le equazioni dei momenti	43
3.3.3	Valutazione della velocità $V$ e degli angoli aerodinamici	45
3.3.4	Verifica della possibilità di equilibrio in <i>hovering</i>	45
3.4	Elettronica di controllo a bordo	47
4	APPARATO PROPULSIVO	49
4.1	Motore.	50
4.1.1	Motore endotermico alternativo.	50
4.1.2	Motore elettrico.	51
4.1.2.1	Svantaggi d'impiego	53
4.2	Organi di propulsione.	54
5	ELETTRONICA FBW DI CONTROLLO	57
5.1	Processo di trasmissione del comando	57
5.1.1	Funzionamento dei servo-attuatori	57
5.1.2	Il segnale PWM	59
5.2	Architettura del FMS	60
5.2.1	Schema a blocchi del FMS	63
<b>II</b>	<b>Progetto di dettaglio Caratterizzazione e realizzazione della macchina</b>	<b>66</b>
6	CELLULA STRUTTURALE	67
6.1	Layout preliminare	69
6.1.1	Stima preliminare del peso	69
6.1.2	Stima della superficie alare	70
6.1.3	Dimensionamento dell'apertura alare	71
6.1.4	Diametro e posizione del vano di alloggiamento del propulsore verticale	72
6.1.5	Stima della posizione del baricentro.	72
6.1.6	Affinamenti della geometria.	74
6.1.7	Scelta dei profili alari.	76
6.1.8	Layout definitivo.	93

## Indice

6.2	Disegno del layout preliminare	94
6.2.1	Disegno del velivolo	94
6.2.2	Disegno delle <i>winglet</i>	97
6.3	Studi di convalidazione dell'aerodinamica	98
6.3.1	Visualizzazioni del flusso	98
6.3.2	Derivate aerodinamiche nel piano longitudinale	102
6.3.3	Verifica delle condizioni di equilibrio longitudinale in volo traslato	103
6.3.4	Spostamento del baricentro e caratteristiche aeromeccaniche della configurazione finale.	105
6.3.5	Verifica della controllabilità longitudinale del velivolo	108
6.3.6	Polare, trazioni e potenze necessarie al volo	108
6.3.7	Derivate aerodinamiche nel piano latero-direzionale	110
6.4	Particolari costruttivi	114
6.4.1	Introduzione	114
6.4.2	Cellula	116
6.4.2.1	Fusoliera	119
6.4.2.2	Semiali	122
6.4.2.3	Elevoni	125
6.4.2.4	<i>Winglet</i>	127
6.4.3	Castello motore dei propulsori di trazione e controllo	129
6.4.4	Supporto del motore di sostentamento	132
6.4.5	Mozzo portaelica del motore di trazione e controllo	143
6.4.6	Elemento anti-precessione	146
6.5	Studio della zona di collocazione degli apparati di bordo	148
6.6	Procedure di realizzazione	151
6.6.1	Fusoliera	151
6.6.2	Semiali	155
6.6.3	Elevoni	159
6.6.4	<i>Winglet</i>	161
6.6.5	Castello motore dei propulsori di trazione e controllo	162
6.6.6	Supporto del motore di sostentamento	163
6.6.7	Mozzo portaelica del motore di trazione e controllo	169



## Indice

- 6.6.8 Elemento anti-precessione 169
- 6.7 Assemblaggio 171
  - 6.7.1 Installazione dei motori di trazione e controllo sulle semiali 171
  - 6.7.2 Incollaggio delle semiali alla fusoliera 173
  - 6.7.3 Incollaggio della semifusoliera inferiore 174
  - 6.7.4 Installazione del motore di sostentamento 175
  - 6.7.5 assemblaggio delle parti minori e verniciatura 176
- 6.8 Costruzione attrezzature accessorie 178
  - 6.8.1 Archetto per il taglio del polistirene estruso. 178
  - 6.8.2 Carrello dinamometrico per la caratterizzazione degli apparati propulsivi. 180
- 7 ELETTRONICA DI CONTROLLO 183
  - 7.1 Radio Tx-Rx 183
  - 7.2 Servo-attuatore 185
  - 7.3 Batterie 186
  - 7.4 Sistema di controllo automatico 187
    - 7.4.1 IMU 187
    - 7.4.2 DSP 189
    - 7.4.3 Telemetria 190
  - 7.5 Sistema di acquisizione e trasmissione delle immagini 191
- 8 PROPULSIONE 193
  - 8.1 Fisica dei motori elettrici brushless 194
    - 8.1.1 Il Motore Ideale 194
    - 8.1.2 Il Motore Reale 196
  - 8.2 Scelta dei motori e delle eliche 199
    - 8.2.1 Scelta del motore di sostentamento 200
    - 8.2.2 Scelta del motore di trazione e controllo 204
    - 8.2.3 Elica di sostentamento 207
    - 8.2.4 Elica di trazione e controllo 208
  - 8.3 Scelta dei regolatori 209
    - 8.3.1 Regolatore di giri del motore di sostentamento 209

## Indice

8.3.2	Regolatore di giri del motore di trazione e controllo	210
8.4	Caratterizzazione e convalida del motore del fan	211
8.5	Caratterizzazione e convalida dei motori di trazione e controllo	215
8.5.1	Test con elica GWS 5 × 4,3	215
8.5.2	Test con elica GWS 6 × 3	218
8.5.3	Test con elica GWS 7 × 3.5	220
8.6	Soluzione del problema delle vibrazioni del propulsore di sostenta- mento	222
9	TRITTICO DIMENSIONATO	224
<b>III</b>	<b>Prove in volo</b>	<b>228</b>
10	PROVE VINCOLATE	229
10.1	Preparazione del velivolo	229
10.1.1	Prove di funzionamento dei propulsori	229
10.1.2	Caricamento dell’FMS sul DSP	230
10.2	Test di volo vincolato	231
11	PROVE DI VOLO IN HOVERING	235
11.1	Test	235
11.2	analisi dei risultati	236
12	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	239
A	PROPRIETÀ INERZIALI DI ALCUNE PARTI DEL VELIVOLO	244
A.1	Semi-fusoliera superiore	244
A.2	Semi-fusoliera inferiore	245
A.3	Semiala destra	246
A.4	Elevone destro	247
A.5	Winglet destra	248
A.6	Castello motore destro	249
A.7	Trave longitudinale	250
A.8	Trave trasversale	251
A.9	Flangia d’attacco del propulsore verticale	252

## Indice

- A.10 Mozzo portaelica 253
- A.11 Elemento anti-precessione 254

## Appendici 244

B RISULTATI GRAFICI DELL'ANALISI FLUIDODINAMICA CFD 255

C TRASFERIMENTO DEL CODICE FMS SULLA UNITÀ DSP 259

Bibliografia 273

Elenco delle figure 274

Elenco delle tabelle 281

Elenco degli acronimi 282