POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale

Avamprogetto di una piattaforma multirotore versatile e a lunga autonomia



Relatori

Prof. Ing. Paolo Maggiore Ing. Matteo D.L. Dalla Vedova

> **Candidato** Stefano Cassone

A.A. 2017/2018

Ringraziamenti

Molte sono le persone che, in questo elaborato, meritano un particolare ringraziamento.

In primis i miei genitori, a cui è dedicata questa Tesi magistrale, i quali mi hanno sempre supportato ed incoraggiato. Se c'è un'immagine che ricorderò piacevolmente di questi anni, sarà sicuramente il loro volto pieno d'orgoglio per un mio esame superato, appena rientrati a casa.

A mia sorella Martina, che mi ha trasmesso la giusta tenacità nei momenti difficili e condiviso con me gioie e sconforti; posso dire che il suo esempio di studio abbia contribuito a farmi arrivare fino a qui.

Un ringraziamento speciale va anche a mia nonna Antonietta, sempre interessata, partecipe e fiera di me in ogni tappa di questa carriera universitaria.

Ringrazio Stefania, che in questi anni ha saputo starmi sempre accanto, supportarmi e sopportarmi, strappandomi un sorriso nei momenti più complicati.

Desidero inoltre ringraziare Franz, mio migliore amico da 11 anni e compagno di tanti venerdì sera tra chiacchiere, consigli e risate, e Miriana, con cui ho condiviso tante giornate e serate di studio intenso ma anche tante soddisfazioni.

Un ringraziamento sentito va al mio relatore, il Prof. Paolo Maggiore, il quale mi ha trasmesso l'interesse verso la sua materia e mi ha affiancato in questo percorso di Tesi, rivelatosi spesso complicato e tortuoso. Un pensiero anche al co-relatore, l'Ing. Matteo Dalla Vedova, per i suoi consigli e la sua disponibilità in ogni situazione.

L'ultimo ringraziamento è rivolto a coloro che mi guardano da lassù, più in alto degli APR e degli aerei, e che sento sempre vicino.

Indice

Introduzione1
Capitolo 1: Il contesto normativo
1.1 Regolamento: Mezzi aerei a pilotaggio remoto
1.2 Circolare: Mezzi aerei a pilotaggio remoto
Centri di addestramento e attestati pilota9
1.3 La Normativa del futuro13
1.3.1 Problema 115
1.3.2 Problema 217
1.3.3 Problema 318
1.3.4 Problema 419
1.3.5 Possibili scenari20
Capitolo 2: Requisiti dell'APR e scenario operativo23
2.1 Requisiti
2.2 Scenario operativo
2.3 Profilo di missione
Capitolo 3: Ricerca di mercato e applicazioni
3.1 Panoramica APR ala rotante e ala fissa32
3.1.1 Ala rotante
3.1.2 Ala fissa
3.2 Applicazioni
Capitolo 4: Configurazione aerodinamica41
4.1 Acquisizione dati
4.2 Configurazioni analizzate49
4.3 Studio di configurazione
4.4 Scenari di volo
4.4.1 Primo scenario
4.4.2 Secondo scenario
Capitolo 5: La scelta dei componenti70
5.1 La propulsione

5.1.1 Motori a spazzole e motori brushless	70
5.1.2 Parametri caratteristici dei motori brushless	74
5.2 Scelta del motore	75
5.3 Elica	
5.3.1 Teoria del disco attuatore (TDA)	
5.3.2 Teoria dell'elemento di pala	
5.3.3 Scelta dell'elica	85
5.4 Regolatori (ESC)	87
5.5 Le componenti interne	
5.5.1 Batteria	
5.5.2 Autopilota	91
$5.5.3 \text{ Modulo GPS} + \text{compass} \dots$	95
5.5.4 Altimetro laser	96
5.5.5 Power module	97
5.5.6 Buzzer	
5.5.7 Telemetry module e Receiver	
5.5.8 Sensori	
Capitolo 6: Geometria, materiali e prove strutturali	
6.1 Geometria e materiali	104
6.1.1 Fusoliera	104
6.1.2 Semiala	105
6.1.3 Longheroni	107
6.1.4 Raccordo	
6.1.5 Copri-raccordo	110
6.1.6 Profilato-supporto motori	111
6.1.7 Assieme motore	112
6.1.8 Carrello	113
6.1.9 Componenti interne fusoliera	115
6.1.10 APR completo	117
6.2 Centro di massa	119
6.3 Analisi strutturale	
6.3.1 Semiala con longheroni	122
6.3.2 Semiala con longheroni e braccio di supporto motori	125
6.3.3Semiala con longheroni, braccio di supporto motori e carrello	
Conclusioni	$\dots 132$

Indice delle figure

Figura	1: Profilo di missione di un semplice multicottero	29
Figura	2: Profilo di missione della nuova configurazione	30
Figura	3: Pro S3 – Venture in dotazione alla Croce Rossa Italiana [9]	37
Figura	4: APR destinato ad ispezioni e rilievi ambientali in dotazione ai VdF [10]	37
Figura	5: FlySecure, APR ad ala fissa della Polizia di Stato [11]	.38
Figura	6: DJI Inspire II durante riprese aeree sportive	.38
Figura	7: Pro S3 - Wavesight utilizzato in agricoltura di precisione [13]	.39
Figura	8: Esempio di rilievo fotogrammetrico [14]	39
Figura	9: San Giovanni - spettacolo aereo nei cieli di Torino [16]	.40
Figura	10: Dimensioni Venture - Pro S3 [6]	.42
Figura	11: Vista isometrica renderizzata Venture - Pro S3 [6]	43
Figura	12: Data log - sessione di volo	44
Figura	13: Data log- particolare a 4 $\mathrm{m/s}$	44
Figura	14: Data log - particolare a 6 m/s	45
Figura	15: Inclinazione del mezzo alla velocità di 10 m/s	46
Figura	16: x8 Skywalker - versione base [17]	.47
Figura	17: x8 Skywalker - versione modificata	.47
Figura	18: Flow trajectories -10° - Venture Pro S3	.49
Figura	19: Cut plot -10° - Venture Pro S3	49
Figura	20: Prima configurazione analizzata	50
Figura	21: Seconda configurazione analizzata	.51
Figura	22: Fusoliera realizzata in SolidWorks	.52
Figura	23: Flow trajectories sulla fusoliera	52
Figura	24: Cut plot - campo di pressioni su sezione di fusoliera	.52
Figura	25: Curve Cl/α [19]	.54
Figura	26: Curve Cd/ α [19]	.55
Figura	27: Curve Cl/Cd [19]	55
Figura	28: Semi-ala realizzata in SolidWorks	57
Figura	29: Flow trajectories sulla semi-ala	57
Figura	30: Cut plot - campo di pressioni su sezione di semi-ala	.58
Figura	31: APR completo realizzato in SolidWorks	.59
Figura	32: Surface plot - campo di pressioni sull'APR completo	.59
Figura	33: Flow trajectories sull'APR completo	.60
Figura	34: Venture - Pro S3 in volo traslato a 10 m/s \dots	.62
Figura	35: APR oggetto di studio in volo traslato a 10 m/s	.63
Figura	36: Schematizzazione delle forze - Venture	.63
Figura	37: Schematizzazione delle forze - APR oggetto di studio	.64
Figura	38: Diagramma di corpo libero ad angolo di attacco nullo	.68
F'igura	39: Motore a spazzole [20]	.71
Figura	40: Motore brushless [21]	.72
Figura	41: Caratteristiche di funzionamento motore a spazzole e motore brushless	-
20 D:		.73
Figura	42: Esempi di datasheet messi a disposizione dai produttori $ 22 23 $.76

Figura 43:	T-Motor MN3510 KV360 [22]	.81
Figura 44:	Esempio elica bipala [26]	.81
Figura 45:	Teoria del disco attuatore	.82
Figura 46:	Teoria dell'elemento di pala	.84
Figura 47:	Elica classica ed elica "foldable" T-motor [28]	.86
Figura 48:	Particolarità aerodinamiche tra le eliche [28]	.87
Figura 49:	ESC NON OPTO [29]	.88
Figura 50:	ESC OPTO [29]	.88
Figura 51:	Herkules - OKTO L [29]	.89
Figura 52:	Batteria Tattu 10000 mAh [31]	.90
Figura 53:	PixHawk PX4 [32]	.92
Figura 54:	3DR GPS module + compass [36]	.95
Figura 55:	Altimetro laser [38]	.96
Figura 56:	Collegamento Power module [40]	.97
Figura 57:	Buzzer [41]	.98
Figura 58:	3DR Radio Telemetry module [43]	.99
Figura 59:	Turnigy 9X Receiver [44]1	100
Figura 60:	Kahone 3-axis Gimbal [46]1	101
Figura 61:	Configurazione finale [47]	102
Figura 62:	Fusoliera con coperchio renderizzata	104
Figura 63:	Messa in tavola - Fusoliera	104
Figura 64:	Semi-ala renderizzata	105
Figura 65:	Messa in tavola - Semi-ala	106
Figura 66:	Longheroni renderizzati	107
Figura 67:	Messa in tavola - Longheroni	107
Figura 68:	Raccordo longherone renderizzato	108
Figura 69:	Messa in tavola - Raccordo	109
Figura 70:	Corpi-raccordo renderizzato	110
Figura 71:	Messa in tavola - Copri-raccordo	110
Figura 72:	Profilato-supporto motori renderizzato	111
Figura 73:	Messa in tavola - Profilato-supporto motori	111
Figura 74:	Assieme motore renderizzato	112
Figura 75:	Assieme motore sezionato	112
Figura 76:	Messa in tavola - Assieme motore	113
Figura 77:	Carrello renderizzato	113
Figura 78:	Messa in tavola - Carrello	114
Figura 79:	Componenti interne e loro alloggiamento1	115
Figura 80:	Dettaglio sensore inferiore1	116
Figura 81:	Messa in tavola componenti interne1	116
Figura 82:	APR completo - vista isometrica1	117
Figura 83:	APR completo - vista frontale	117
Figura 84:	APR completo - vista superiore	118
Figura 85:	Messa in tavola APR completo	118
Figura 86:	Posizione centro di massa - vista superiore1	119

Figura 8'	7: Posizione centro di massa - vista laterale	120
Figura 88	8: Dettaglio posizionamento centro di massa	120
Figura 89	9: Sistema di riferimento	121
Figura 90	0: Applicazione vincolo – caso 1	
Figura 91	1: Applicazione carichi - caso 1	
Figura 92	2: Mesh - caso 1	123
Figura 93	3: Spostamento - caso 1	124
Figura 94	4: Deformazione - caso 1	125
Figura 9	5: Applicazione carichi - caso 2	
Figura 90	6: Mesh - caso 2	126
Figura 9'	7: Spostamento - caso 2	127
Figura 98	8: Deformazione - caso 2	
Figura 99	9: Applicazione carichi - caso 3	
Figura 10	00: Mesh - caso 3	129
Figura 10	01: Spostamento - caso 3	130
Figura 10	02: Deformazione - caso 3	131
Figura 10	03: Render finale	

Indice delle tabelle

Tabella 1: Numero di autorizzazioni concesse nel 2015 [3]	.14
Tabella 2: Requisiti normativi negli Stati europei [3]	.16
Tabella 3: Analisi di mercato - APR ad ala rotante	.34
Tabella 4: Analisi di mercato - APR ad ala fissa	.35
Tabella 5: Valori di portanza al variare dell'angolo di attacco per la fusoliera	.53
Tabella 6: Legenda colori curve Cl/ α , Cd/ α e Cl/Cd	.54
Tabella 7: Valori di portanza al variare dell'angolo di attacco per la semi-ala	.58
Tabella 8: Valori di portanza al variare dell'angolo di attacco per l'APR completo.	.60
Tabella 9: Valori di portanza per l'APR completo a diverse velocità e angolo di	
attacco nullo	.61
Tabella 10: Valori delle forze per le due configurazioni in volo traslato a 10 m/s	.65
Tabella 11: Portanza e resistenza a diverse velocità con angolo di attacco nullo	.66
Tabella 12: Studio statistico velocità - resistenza	.66
Tabella 13: Studio statistico velocità - portanza	.67
Tabella 14: Tempi di volo e spazio percorso in planata	.69
Tabella 15: Caratteristiche motori - prima scrematura	.78
Tabella 16: Caratteristiche motori - seconda scrematura	.78
Tabella 17: Dimensioni e peso del motore	.81
Tabella 18: Confronto eliche considerate	.86
Tabella 19: Dimensioni e peso dell'elica	.87
Tabella 20: Dimensioni e peso Herkules	.89
Tabella 21: Dimensioni e peso della batteria	.91
Tabella 22: Dimensioni e peso PixHawk	.93
Tabella 23: Tempo di risposta PixHawk-APR	.95
Tabella 24: Dimensioni e peso GPS module + compass	.96
Tabella 25: Dimensioni e peso altimetro laser	.96
Tabella 26: Dimensioni e peso del power module	.97
Tabella 27: Dimensioni e peso buzzer	.98
Tabella 28: Dimensioni e peso Radio Telemetry	.99
Tabella 29: Dimensioni e peso Turnigy Receiver1	00
Tabella 30: Dimensioni e peso Kahone 3-axis Gimbal1	101
Tabella 31: Proprietà fibra di carbonio1	108
Tabella 32: Proprietà Nylon 12 CF1	109
Tabella 33: Posizione centro di massa1	121
Tabella 34: Dettagli mesh - caso 11	124
Tabella 35: Dettagli mesh - caso 21	127
Tabella 36: Dettagli mesh - caso 31	130

Indice dei grafici

Grafico 1: Confronto Cl/ α e validazione FlowSimulation	
Grafico 2: Portanza al variare della velocità per l'APR completo	61
Grafico 3: Spinta al 50% di manetta dei 5 motori considerati	79
Grafico 4: Efficienza al 50% di manetta dei 5 motori considerati	79
Grafico 5: Pesi dei 5 motori considerati	80
Grafico 6: Fase di decelerazione	94
Grafico 7: Fase di accelerazione 1	94
Grafico 8: Fase di accelerazione 2	94

Introduzione

Al giorno d'oggi, tra le aziende produttrici di APR, si riscontra una netta separazione tra la tecnologia ad ala rotante e quella ad ala fissa. La possibilità di montare motori "tiltabili" è uno dei tentativi di coniugare le due tecnologie, ritenuto però particolarmente complesso e non sempre affidabile. Da qui nasce l'obiettivo di questa Tesi di laurea magistrale: progettare un APR che unisca i vantaggi delle due configurazioni, attraverso la definizione di una nuova geometria di semplice realizzazione.

La base di partenza di questo studio sarà costituita dall'aspetto normativo e da un'ampia analisi di mercato. Il primo, sviluppato in maniera approfondita all'interno del capitolo 1, metterà in luce come esista l'obbligo di attestati diversi in base al peso della macchina; questo aspetto andrà a definire uno dei requisiti principali del progetto, mostrati nel capitolo 2. L'analisi di mercato, invece, sarà trattata all'interno del capitolo 3 ed evidenzierà come al momento non esistano soluzioni simili al progetto di studio a disposizione di aziende e/o privati.

Lo studio di configurazione definirà il vero e proprio centro del progetto: tramite studi di design e aerodinamici eseguiti mediante il software SolidWorks ed il suo solutore CFD Flow Simulation, si arriverà alla forma e alle dimensioni del mezzo, mostrandone quindi il comportamento durante il volo traslato, vero punto di forza della nuova configurazione. I diversi studi di ottimizzazione e i calcoli relativi verranno mostrati all'interno del capitolo 4.

Nel capitolo 5, ampio risalto sarà dato inoltre alla scelta dei componenti, alla loro interfaccia e alle soluzioni che ne permettono il corretto funzionamento; l'esperienza maturata in azienda, in questo senso, ha permesso di conoscere aspetti chiave e di arrivare quindi alla definizione degli spazi interni e della corretta collocazione finale. Le nuove tecnologie costruttive e i nuovi materiali avranno anch'essi un ruolo importante: con il progresso tecnologico, oggigiorno, è possibile realizzare componenti che fino ad un decennio fa sarebbero risultati troppo complessi e costosi. L'additive manufacturing, in particolare, offre soluzioni che si possono dire quasi illimitate. Tutto ciò permette di realizzare una struttura molto leggera e al contempo resistente, rispettando uno dei requisiti più stringenti di tutto il progetto: il peso. A valle di queste scelte sarà necessario eseguire delle prove strutturali che validino anche in questo senso l'APR oggetto di studio; tali prove saranno eseguite mediante il solutore Simulation, presente all'interno della suite SolidWorks, e i risultati trovati verranno inseriti nel capitolo 6.

Trattandosi di uno studio di avamprogetto, sarà quindi fornito un approccio multidisciplinare ad una tematica molto ampia e in continuo sviluppo, non solo dal punto di vista tecnologico ma anche e soprattutto da quello legislativo/normativo. La configurazione risultato di questo studio potrà, in tal senso, essere rivista in futuro e migliorata nei suoi aspetti chiave.

Capitolo 1

Il contesto normativo

1.1 Regolamento: Mezzi aerei a pilotaggio remoto

La possibilità di far volare un velivolo senza pilota a bordo viene registrata per la prima volta durante la Seconda Guerra mondiale e già nel 1944 l'ICAO, nella Convenzione di Chicago, riconosce l'esistenza degli UAS, Unmanned Aircraft Systems. Questo tipo di tecnologia è rimasta per decadi relegata all'esclusivo utilizzo militare fino a quando a partire dal 2005 circa, sono state dimostrate l'effettiva competitività e praticabilità della tecnologia RPAS, Remotely Piloted Aircraft Systems. Tutto ciò ha permesso che questa si diffondesse in molti settori e non venisse più solamente relegata all'ambito militare.

La rapida diffusione registrata negli ultimi anni ha richiesto un adeguamento alle normative che "abbracciasse" molti degli aspetti non ancora indagati o chiariti a fondo. L'ente italiano preposto a redigere il regolamento è l'ENAC (Ente Nazionale Aviazione Civile). In particolare, nel documento "Mezzi aerei a pilotaggio remoto", nell'Edizione 2 con l'aggiunta dell'Emendamento 4 del 21/05/2018, si trovano in diverse sezioni e sotto diversi articoli, tutte le regole da seguire per un'attività corretta e nel pieno rispetto della legge, sia l'APR utilizzato per scopi professionali sia esso destinato ad uso hobbystico/aeromodellismo [1].

Nella Sezione 1, legata alla generalità, all'Articolo 1 è enunciata la definizione più adeguata ai mezzi aerei a pilotaggio remoto; essa recita: "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".

Viene inoltre introdotta una seconda definizione: i SAPR, acronimo di Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto, con cui si intende semplicemente il sistema costituito da un mezzo aereo utilizzato per scopi professionali e dai relativi componenti indispensabili per il comando e il controllo (stazione di controllo) da parte di un pilota remoto.

Sono assoggettati al regolamento ENAC tutti i SAPR di massa operativa al decollo non superiore a 150 kg, mentre non rientrano sotto competenza ENAC i SAPR che svolgono attività in spazi chiusi, i palloni frenati oppure quelli utilizzati per osservazioni scientifiche.

A seguito di alcuni articoli in cui si parla degli scopi del regolamento (Art. 3), delle fonti normative (Art. 4) e di definizioni e acronimi che saranno utilizzati nel seguito (Art. 5), il regolamento entra nel vivo con l'Art. 6 in cui viene specificata una prima importante distinzione:

- SAPR con mezzi aerei di massa operativa al decollo minore di 25 kg;
- SAPR con mezzi aerei di massa operativa al decollo uguale o maggiore di 25 kg e non superiore a 150 kg.

Nel seguente articolo, vengono inoltre definiti gli impieghi dei SAPR e le operazioni (VLOS, EVLOS, BVLOS) nei quali possono essere impiegati.

All'interno della sezione II, il Regolamento analizza in particolare i SAPR con mezzi aerei di massa operativa al decollo minore di 25 kg, la prima distinzione identificata in precedenza. Nell'Art. 8 si annoverano quindi i requisiti generali per l'impiego dei SAPR, di cui si riportano i punti principali:

- 1. Ogni mezzo aereo e la stazione di terra a cui è collegato devono essere identificati mediante l'apposizione di una targhetta riportante i dati identificativi del sistema e dell'operatore.
- 2. Dal 1 luglio 2016, il SAPR deve essere dotato di un dispositivo elettronico di identificazione; tale dispositivo deve essere in grado di trasmettere in tempo reale dati inerenti l'APR ed il proprietario, informazioni di volo e la loro registrazione.

- 3. Per le attività in VLOS e in spazi aerei non controllati, si prevede di installare sul mezzo aereo luci o altri dispositivi di segnalazione che possano favorire la sua vista al pilota/operatore ed eventualmente agli altri utilizzatori dello spazio aereo.
- 4. I SAPR devono essere condotti da un pilota che abbia superato un apposito esame di conseguimento dell'Attestato di volo.
- 5. Per le operazioni condotte in VLOS, il pilota al comando di un SAPR deve poter risultare visibile ed identificabile; per questo motivo risulta obbligatorio l'uso di giubbetti ad alta visibilità recanti la scritta "pilota di APR".

Le operazioni specializzate in cui l'APR si può trovare a lavorare possono essere di due tipi, come definite dagli Art. 9 e 10 del regolamento:

- <u>Operazioni non critiche</u>: operazioni condotte in VLOS che non prevedono il sorvolo di aree congestionate, assembramenti di persone, agglomerati urbani o infrastrutture sensibili. Durante queste attività, l'operatore deve presentare ad ENAC la dichiarazione che attesti la rispondenza alle sezioni applicabili del regolamento ed è inoltre responsabile "di valutare il rischio associato alle operazioni ed il permanere delle condizioni che fanno ritenere non critiche le operazioni".
- <u>Operazioni critiche</u>: operazioni specializzate che non rispettano, anche solo una delle condizioni inserite nell'Articolo precedente. Le condizioni per effettuare un'operazione di questo tipo sono molto più stringenti e richiedono oltre all'autorizzazione da parte di ENAC, anche un livello di sicurezza coerente con l'esposizione al rischio, un dispositivo di terminazione del volo indipendente dal sistema primario di comando e controllo del mezzo. Sempre attestando un adeguato livello di sicurezza, è consentito il sorvolo di aree urbane in VLOS mentre risulta in ogni caso proibito il sorvolo di assembramenti di persone, per cortei, manifestazioni sportive o spettacoli.

Appartenenti a questa categoria di APR sotto i 25 kg, troviamo ovviamente gli APR di massa operativa al decollo minore o uguale a 2 kg, a cui viene dedicato un articolo apposito, l'Art. 12.

Viene specificato che tutte le operazioni specializzate condotte con SAPR di massa operativa al decollo inferiore o uguale a 2 kg sono considerate non critiche in tutti gli scenari operativi, a patto che il mezzo APR possieda caratteristiche di inoffensività precedentemente accertate da ENAC. Nel punto 5 dello stesso articolo viene inoltre affrontata la tematica relativa agli APR con peso inferiore ai 300 g, i cosiddetti "trecentini": qualora sia rispettato il vincolo di peso, vi siano protezioni delle parti rotanti e la velocità massima sia minore o uguale a 60 km/h, tutte le operazioni realizzate con l'APR sono da considerarsi non critiche in tutti gli scenari, e inoltre al pilota non è richiesto il possesso di un Attestato di volo.

L'Art. 13 chiude di fatto la sezione riguardante gli APR con massa al decollo inferiore a 25 kg, e specifica la procedura per i costruttori (le aziende) per l'emissione della Certificazione di Progetto, utile nel caso si intendano produrre i SAPR in serie. Esso contiene tutti i dati relativi alla configurazione che si intende produrre, la strumentazione, i dispositivi che è possibile impiegare, gli scenari e varie condizioni e/o limitazioni. Una volta compilato seguendo un template definito, dovrà essere inviato a ENAC perché possa quindi emetterlo e dichiarare il costruttore idoneo.

Nella sezione III del Regolamento viene affrontata invece la tematica dei SAPR con massa operativa al decollo uguale o superiore ai 25 kg. Tali APR necessitano ovviamente di opportuna registrazione con l'apposizione di targhette di identificazione sia sul mezzo aereo sia sulla stazione di terra.

Per ottenere il Permesso di Volo per attività specializzate o di sperimentazione, il proprietario del SAPR deve presentare domanda all'ENAC e fornire i documenti necessari a dichiarare la capacità del sistema di operare in sicurezza. Qualora l'attività lo richieda, si può inoltre richiedere la segregazione dello spazio aereo. Nel caso si tratti di operazioni sperimentali, il Permesso di Volo viene rilasciato per il periodo di tempo necessario allo svolgimento della relativa attività. Diverso è invece il caso per le operazioni specializzate, per le quali il Permesso di Volo può avere durata massima di 3 anni.

A partire dalla sezione IV vengono definiti i requisiti e le disposizioni per il pilotaggio degli APR. Ai fini della conduzione di un mezzo è richiesto al pilota il possesso di un riconoscimento appropriato, in corso di validità, che ne certifichi l'idoneità. Al principio dell'Art. 20 viene specificato quando segue: "Ai sensi del Codice della Navigazione, il pilota è responsabile della condotta in sicurezza del volo".

Il riconoscimento di competenza può essere ottenuto da qualunque persona che abbia almeno 18 anni e presenti un'adeguata idoneità psicofisica. Tutti gli aspetti relativi al conseguimento dell'Attestato di pilota verranno chiariti nel seguito, facendo riferimento all'apposita Circolare, anch'essa messa a disposizione da ENAC e rivista nel corso degli ultimi 2 anni.

La Sezione V illustra le regole di circolazione e utilizzo dello spazio aereo. Gli articoli 24, 25 e 26 descrivono rispettivamente le operazioni in VLOS (*Visual line of sight*), EVLOS (*Extended visual line of sight*) e BVLOS (*Beyond visual line of sight*).

<u>Operazioni in VLOS</u>: in queste operazioni il pilota deve essere in grado di mantenere il contatto visivo diretto con l'APR in modo da poter evitare eventuali collisioni con aeromobili, persone, veicoli o infrastrutture di ogni tipo. Tali operazioni sono consentite di giorno, fino ad un'altezza massima di 150 metri e fino ad una distanza massima di 500 metri. Nel caso si volesse volare a distanze e altezze maggiori, è necessaria autorizzazione da ENAC.

Qualsiasi tipo di operazione non può comunque avere luogo:

- 1. all'interno dell'ATZ di un aeroporto, ad una distanza inferiore a 5 km dallo stesso oppure in linea con le traiettorie di decollo e atterraggio degli aeromobili;
- 2. all'interno dei CTR;
- 3. all'interno delle aree regolamentate attive e delle aree proibite.

Le operazioni dei SAPR all'interno dei CTR di fatto godono di un'eccezione nel caso i sistemi con mezzi aerei abbiano massa operativa al decollo inferiore a 25 kg; questi ultimi posso volare fino a 70 metri di quota e fino ad una distanza massima di 200 metri.

<u>Operazioni in EVLOS</u>: operazioni in cui il pilota adotta metodi alternativi per mantenere il contatto visivo con il SAPR, conservando ovviamente tutte le responsabilità nell'evitare collisioni. Il tutto è quindi legato all'utilizzo di stazioni di terra ausiliarie che permettano di mantenere il contatto visivo con il SAPR. Le operazioni in EVLOS godono delle medesime modalità e limitazioni di quelle in VLOS.

<u>Operazioni in BVLOS</u>: operazioni condotte oltre i limiti orizzontali e verticali VLOS, e quindi a distanze a cui la semplice osservazione visiva non consente l'attuazione di procedure per evitare eventuali collisioni. Questo tipo di operazione necessita quindi di sistemi e procedure per il mantenimento della separazione e per evitare le collisioni; tutto ciò richiede ovviamente l'approvazione da parte di ENAC. In base alla valutazione del rischio da parte dell'operatore SAPR, si può eventualmente provvedere a richiedere la segregazione temporanea dello spazio aereo. L'Art. 27 inoltre completa questo discorso, specificando che in caso di traffico interferente di un altro aeromobile, le operazioni SAPR in VLOS e in EVLOS non hanno diritto di precedenza e il pilota deve attenersi al "see and avoid", ovvero evitando l'altro mezzo e atterrando immediatamente oppure portarsi ad un'altezza massima di sicurezza di 25 m. Ulteriore limitazione per le operazioni "non critiche" in VLOS e in EVLOS è che possano svolgersi ad una distanza di sicurezza di almeno 150 m dalle aree congestionate ed almeno 50 m dalle persone che non siano sotto il diretto controllo dell'operatore SAPR.

Nella Sezione VI e in particolare nei suoi Art. 28, 29 e 30, vengono illustrate le disposizioni generali per i SAPR, specificando che:

- l'operatore è tenuto a conservare e rendere disponibile all'ENAC la documentazione prodotta per dimostrare di aver seguito le disposizioni del regolamento;
- qualora si verifichino incidenti o inconvenienti gravi, l'operatore, il costruttore, l'organizzazione di progetto o il pilota di SAPR (a seconda delle responsabilità) devono comunicare immediatamente quanto accaduto direttamente a ENAC;
- l'effettuazione di operazioni specializzate senza le dovute autorizzazioni o con comprovata non rispondenza al Regolamento, possono comportare la sospensione totale o parziale delle autorizzazioni o delle certificazioni rilasciate o annullare i privilegi ottenuti.

Nei seguenti articoli della Sezione VI vengono inoltre approfondite le questioni riguardanti Data Link, Assicurazione, Security e Protezione dei dati e privacy, rispondente al Decreto Legislativo 30 giugno 2003, n. 196.

All'interno della penultima sezione, la VII, viene discussa la tematica relativa agli Aeromodelli. L'aeromodellista è la persona più "svantaggiata" descritta all'interno del Regolamento, in quanto oltre ovviamente ad essere responsabile di utilizzare il mezzo in modo da non arrecare rischi a persone o beni a terra, mantenere la separazione da ostacoli, evitare collisioni in volo e dare precedenza a tutti, dovrà fare in modo che la sua attività avvenga:

• di giorno, mantenendo continuamente il contatto visivo con l'aeromodello senza l'utilizzo di dispositivi ausiliari;

- in aree opportunamente selezionate, fino ad un'altezza massima di 70 m ed entro un raggio di 200 m, in zone non popolate, abbastanza distante da edifici, infrastrutture e installazioni;
- al di fuori dell'ATZ di un aeroporto, oppure ad una distanza superiore a 5 km dallo stesso;
- al di fuori dei CTR;
- al di fuori delle zone regolamentate attive e delle zone proibite.

Tra le zone proibite per gli aeromodellisti, figurano anche i parchi pubblici: una restrizione che privilegia ovviamente la sicurezza e l'incolumità delle persone ma che per qualcuno potrebbe risultare molto restrittiva.

Tutti questi vincoli per gli aeromodellisti portano quindi a pensare di prendere in considerazione l'idea di dotarsi di apposito brevetto, per poter volare ovviamente con regole ben definite e nel rispetto di esse, ma in zone più appetibili e interessanti. Nel sotto-capitolo seguente 1.2 verrà discussa la "Circolare LIC-15" per cercare di fare chiarezza anche per quanto riguarda gli attestati da pilota, una delle problematiche più rilevanti emersa in questo contesto.

1.2 Circolare: Mezzi aerei a pilotaggio remoto Centri di addestramento e attestati pilota

Come viene specificato al principio del documento, lo scopo della Circolare è "di fornire le procedure e le modalità per il conseguimento dell'Attestato di Pilota APR e per la certificazione del Centro di Addestramento APR.".

Mentre nel Regolamento si parlava semplicemente di due diverse categorie, sotto e sopra i 25 kg, all'interno della Circolare vengono evidenziate 3 classi, in base alla massa operativa al decollo (MOD), e 4 categorie in base alla tipologia di meccanica del volo [2].

Il tutto si riassume come segue:

Classe: Very light (VL) $0.3 \text{ kg} < \text{MOD} \le 4 \text{ kg}$ Light (L) $4 \text{ kg} < \text{MOD} \le 25 \text{ kg}$ Heavy (H) MOD > 25 kg Categorie: Ala fissa (Ap) Elicotteri (Hc) Multicotteri (Mc) Dirigibile (As)

Le Classi/Categorie riportate sugli Attestati di Pilota avranno pertanto le seguenti sigle:

VL/ApAPR ala fissa $0.3 \text{ kg} < \text{MOD} \le 4 \text{ kg}$ APR elicottero 0.3 kg < MOD \leq 4 kg VL/HcVL/Mc APR multicottero 0.3 kg < MOD \leq 4 kg VL/AsAPR dirigibile 0.3 kg < MOD \leq 4 kg L/Ap APR ala fissa 4 kg < MOD \leq 25 kg L/Hc APR elicottero 4 kg < MOD ≤ 25 kg L/McAPR multicottero 4 kg < MOD \leq 25 kg L/AsAPR dirigibile 4 kg < MOD \leq 25 kg

Il Centro di Addestramento (CA) rilascia l'Attestato di Pilota APR in funzione della classe e della categoria del mezzo. A differenza di quanto avveniva in passato, il corso per l'ottenimento dell'Attestato si compone di una parte teorica e di una pratica di volo.

La parte teorica si compone di 4 discipline diverse, spiegate all'interno dell'Allegato A:

- <u>Normativa aeronautica</u> (4 ore): organizzazioni ed enti aeronautici, normativa italiana, regole dell'aria e suddivisione spazi aerei, privilegi e limitazioni dell'attestato, documenti, infrazioni e sanzioni, incidenti e inconvenienti di volo;
- <u>Meteorologia</u> (2 ore): nozioni generali, condizioni atmosferiche, visibilità in volo e al suolo;
- <u>Circolazione aerea</u> (3 ore): servizi ATS, frequenze aeronautiche, alfabeto ICAO, fraseologia comune;
- <u>Impiego del SAPR</u> (7 ore): principi del volo, componenti del mezzo aereo a pilotaggio remoto, chip di controllo, motori e batterie, procedure e sistemi di

emergenza, modi di navigazione del mezzo aereo, caratteristiche e manutenzione SAPR.

Il corso prevede all'incirca 15 ore di lezione, da frequentarsi in aula oppure parte in aula e parte in "distance learning", per un numero di ore non superiore al 50% delle ore totali previste per il corso teorico approvato al Centro di Addestramento APR. Al termine di esso, è necessario sostenere un test a risposta multipla composto da 24 domande che coprano in maniera eguale tutti gli argomenti del corso; l'esame teorico è da ritenersi superato se il numero di risposte corrette è almeno il 75% delle domande. La parte pratica con l'APR consiste in un minimo di 30 missioni con durata della singola missione di almeno 10 minuti; le missioni sono volte all'apprendimento di manovre di coordinazione stabilite in funzione delle categorie e classi di APR e consistono nel prendere dimestichezza nel realizzare figure in volo utilizzando contemporaneamente i vari comandi a disposizione sul radiocomando. Al termine di ciò, il candidato dovrà superare un esame con un Esaminatore APR, consistente in una missione da almeno 10 minuti.

Il pilota già in possesso dell'attestato per una determinata categoria o classe può ottenere una nuova abilitazione superando semplicemente la parte pratica relativa alla nuova categoria/classe; la parte pratica del corso in questo caso consta di almeno 12 missioni di durata singola di almeno 10 minuti.

Ogni Attestato di Pilota APR ha validità 5 anni, al termine dei quali il pilota deve recarsi in un Centro di Addestramento, frequentare un corso di aggiornamento teorico, che preveda almeno la materia "Normativa Aeronautica", e superare un controllo di competenza con un Esaminatore APR. Il "rinnovo" può avvenire entro e non oltre i 12 mesi dalla data di scadenza dell'Attestato, dopo di che il pilota dovrà sottoporsi necessariamente a tutte le prove per il conseguimento dell'Attestato.

Un'altra cosa da tenere in stretta considerazione è il fatto che il pilota non può effettuare operazioni di volo specializzate se nei 90 giorni precedenti alla data dell'attività non ha effettuato almeno 3 distinti voli con l'APR. Egli può e deve tenere traccia di tutto ciò: ogni missione con rispettivamente data, luogo, scopo del volo, ora decollo, ora atterraggio e tempo di volo in minuti, deve essere registrata in un apposito Log Book. Inoltre, come viene specificato nella Circolare al punto 5.6: "La compilazione del libretto di volo avviene in regime di autocertificazione, sotto la completa responsabilità civile e penale del dichiarante che, in caso di falsa attestazione, incorre nelle sanzioni previste dal DPR n. 445/2000, oltre al rifiuto del riconoscimento delle

attività da parte dell'ENAC e la sospensione o revoca del titolo aeronautico interessato.". Si evince chiaramente come tale documento abbia una certa importanza per ogni pilota; esso deve inoltre essere composto di pagine rilegate non asportabili e numerate.

In aggiunta alle abilitazioni citate in precedenza è possibile ottenere quella per effettuare le operazioni *critiche*; con questo termine si identificano tutte quelle operazioni che, previa autorizzazione ove richiesta, permettono di:

- avvicinarsi ai centri cittadini;
- volare in prossimità di elettrodotti;
- sorvolare i centri urbani con drone in vira del pilota, una volta comprovato un livello di sicurezza sufficiente;
- eseguire operazioni senza area di buffer e anche in presenza di altre persone nell'area di volo purché sotto il diretto controllo dell'operatore.

È ovvio che l'abilitazione per le operazioni critiche necessiti di un corso specifico presso un Centro di Addestramento APR. A tale corso di abilitazione sono ammessi i piloti in possesso dell'Attestato di Pilota APR in corso di validità e che abbiano esperienza di almeno 36 missioni di volo APR, per almeno 6 ore di volo complessive. Anche in questo caso è previsto un corso teorico di almeno 12 ore, comprendente lezioni relative alle conoscenze professionali di condotta dell'APR in operazioni critiche e altre legate alle procedure amministrative. Essa si compone di due diversi moduli, illustrati nel dettaglio all'interno dell'Allegato B:

- <u>Prestazioni di volo e pianificazione</u> (6 ore): principi di aerodinamica e statica, principi di volo degli APR (ala fissa, elicottero, multicottero, dirigibile), pesi e centraggio, inviluppo di volo con effetto della quota e della temperatura, procedure e fasi di volo (check listi, per/post flight,...), evoluzione e previsione dei fenomeni meteo, verifiche sul luogo;
- <u>Safety e gestione del rischio</u> (6 ore): principi di safety, fattore umano, verifica rispondenza alle norme, risk management (pericoli, probabilità, matrice di rischio,...), identificazione della missione, verifica fattibilità, preparazione e disponibilità di mezzi ed equipaggiamenti.

Al termine di questi è previsto un ulteriore test con almeno 20 domande a risposta multipla.

Per quanto riguarda la parte pratica, essa consiste in almeno 36 missioni, ognuna di 10 minuti, articolate in funzione degli specifici scenari addestrativi; anche in questo caso è previsto un esame in volo il quale dovrà essere rappresentativo degli scenari specifici e consistere in una missione di almeno 10 minuti.

Le Sezioni 6.2 e 6.3 trattano invece delle Abilitazioni come Istruttore di Volo ed Esaminatore APR, e dal momento che poco hanno a che vedere con la trattazione, verranno tralasciate.

A partire dalla Sezione 7, e nelle successive 8 e 9 vengono affrontati temi distanti dallo scopo della Tesi ma comunque interessanti al lettore più o meno esperto, quali:

- 1. Conversioni: titoli APR rilasciati prima che entrasse in vigore la Circolare oppure da altre autorità competenti.
- 2. Approvazione Centro di Addestramento APR: requisiti perché l'organizzazione che rilascia il titolo possa essere giudicata idonea da parte di ENAC e descrizione delle figure che devono essere presenti per poter fornire il servizio di addestramento atteso.
- 3. Procedura per l'Approvazione del Centro di Addestramento APR: step necessari per richiedere l'Approvazione e quindi l'idoneità a seguito dell'invio del modulo ENAC APR 02.

1.3 La Normativa del futuro

Dal momento che allo stato dell'arte ogni Paese dell'Unione Europea possiede un proprio regolamento, da qualche anno gli organi nazionali stanno cercando di tracciare una linea comune da seguire al fine di cercare di uniformare un ambito così vasto e ricco di sfaccettature come quello degli APR. I risvolti economici che gli analisti specializzati vedono per questa tecnologia, hanno fatto sì che ci rendesse conto che solo attraverso norme e standard industriali comuni, si possa realmente favorire lo sviluppo di un vero mercato dei SAPR per applicazioni civili.

Il problema non è solo legato al Regolamento in sé ma anche al numero sempre crescente di operatori in ogni Stato; richiedere documentazione e autorizzazione per il singolo risulta molto costoso e risulta anche molto oneroso per le amministrazioni incaricate di rilasciare tali permessi, sommerse da richieste e non in grado di operare con celerità laddove sia richiesta.

All'interno del documento "European Commission – Impact assessment" vengono mostrati dei dati molto significativi: tra il 2012 e il 2015 il numero di operatori APR riconosciuti in Francia è passato da 100 a circa 1000; in Polonia si è passati da 0 nel 2012, 5 nel 2013, 316 nel 2014 ai 1000 del 2015. È evidente come i numeri siano in rapida crescita e si può trovare riscontro di tutto ciò nella tabella seguente [3].

$\mathbf{Country}/\mathbf{region}$	Number of approved commercial operators
Australia	100+
EU	2,500+
Japan	14,000+
South-Korea	130
USA	1,000+

Tabella 1: Numero di autorizzazioni concesse nel 2015 [3]

Risulta evidente come un approccio aeronautico convenzionale, basato su regole stabilite da ogni Stato, non sia più praticabile o che comunque rischi di far perdere competitività all'Europa rispetto agli altri Paesi del mondo.

Nel 2015 è nato quindi JARUS, Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems, organismo formato da un gruppo di esperti provenienti dalle National Aviation Authorities e dalle organizzazioni di sicurezza in ambito avionico [3]. Come si può leggere dal loro sito Internet, il proposito di tale organismo è quello di creare un singolo documento che racchiuda un set di requisiti tecnici, di sicurezza e operazionali per la certificazione e l'integrazione "sicura" degli Unmanned Aircraft Systems (UAS) all'interno dello spazio aereo. In pratica si occupa di formulare un Regolamento comunitario che possa andare ad appianare le divergenze legislative tra i vari Stati per quanto riguarda i sistemi senza pilota.

JARUS è formata al momento da rappresentanti provenienti da 52 Paesi, dall'European Aviation Safety Agency (EASA) e da EUROCONTROL, tutti impegnati e propensi verso un unico scopo comune.

Finora sono stati rilasciati diversi documenti e studi riguardanti il panorama odierno degli UAV, specificando ed evidenziando in particolare i problemi che verranno trattati nel seguito.

1.3.1 Problema 1

Il primo problema che è sorto dai report pubblicati da JARUS consiste nel fatto che ogni Stato possiede regole differenti, portando quindi ad evidenziare diversi requisiti all'interno del mercato. La capacità di commercializzare APR attraverso i confini è indispensabile per creare economie di scala e minori costi di sviluppo del prodotto, evitando la necessità di tipi o modelli diversi per i diversi mercati nazionali. Viene portato l'esempio di una società di ispezione di infrastrutture offshore altamente specializzata: essa deve essere in grado di operare oltre il proprio paese di origine per servire mercati di nicchia in altri paesi con infrastrutture offshore affinchè possa arrivare ad avere una base di clienti sufficientemente ampia.

Il criterio del peso è quello preponderante nella maggior parte dei Paesi, in combinazione con altri criteri quali l'area sorvolata, se le operazioni avvengano o meno in linea di vista e la quota rispetto al suolo. I requisiti in termini di peso, specialmente, rendono alcune operazioni impossibili da realizzare anche qualora il sorvolo avvenga sopra un'area non popolata e il rischio per terzi sia quasi totalmente assente.

Tutto questo, come già detto, va a penalizzare notevolemente l'economia legata a questo mondo e la sua crescita; le forniture transfrontaliere, le ispezioni delle infrastrutture, o l'introduzione di operazioni su scala europea organizzate secondo un particolare modello operativo, come le consegne a domicilio, risultano gravemente ostacolate.

La necessità di soddisfare requisiti divergenti contemporaneamente costringe gli operatori a soddisfare i requisiti più severi in ogni criterio (peso, area operativa, altitudine, velocità, linea di vista, ecc.). In alcuni casi, i requisiti nazionali si escludono a vicenda e spesso le autorizzazioni devono essere ottenute separatamente in ciascuno Stato membro in quanto non vi è riconoscimento reciproco.

A testimonianza della frammentarietà e della diversità tra le diverse normative europee, viene riportata di seguito una tabella esplicativa dei principi requisiti da rispettare, in termini di categorie e aree consentite:

15

Member	Drone categories	Categories of	Area allowed to be overflown
State		permitted operations	
AT	Below 5 kg MTOW (maximum take-off weight) Between 5-25 kg Between 25 -150 kg	VLOS (visual line of sight) only	Undeveloped, Unpopulated, Populated, Densely populated
DK	Below 7 kg MTOW Between 7-25 kg Between 25 -150 kg	VLOS only-<100m AGL (above ground level)	150m from road and buildings; never over densely built-up areas
FR	Below 2 kg MTOW Between 2-25 kg Between 25 -150 kg	S1= VLOS < 100m distance from pilot S2= VLOS, within 1,000m distance from pilot - <50m AGL S3= VLOS, within 100m distance from pilot S4= observations – 150m AGL	S1= unpopulated area S2= unpopulated area S3= populated area S4= unpopulated area
DE	Below 5 kg MTOW: Länder Above 5 kg: federal competence	VLOS only, <100m AGL	
ES	2 main categories: Below/Above 25 kg	<pre><2kg: BVLOS & AGL<120m <25kg VLOS 500m and AGL<120m >25kg: subject to the imposed by CAA</pre>	<2kg : only away from habited places <25kg : only away from habited places Above 25kg: specific conditions
ΙΤ	2 main categories: Below/Above 25 kg CAA may provide simplified procedures for drones <2 kg	"V70": 70 m (230 ft) max AGL and 200 m radius "V150": 150 m (500 ft) AGL and 500 m radius	At least 150 m from congested areas and at least 50 m from persons and property
PL	Two main categories: Below 25 kg MTOW Between 25 -150 kg	- VLOS - BVLOS (in segregated airspace)	Outside aerodromes and landing side (5km); outside controlled traffic zones, and R, D airspace zones.
SE	Below 1.5 kg MTOW or <150 joule Between 1.5 and 7 kg or <1,000 joule Between 7 -150 kg	S1= VLOS, Below 1.5kg S2= VLOS, 1.5 and 7kg S3= VLOS, >7kg S4= BLOS Always < 120 m AGL	Distance RPAS/persons and property: >50m
UK	Below 20 kg MTOW excl. fuel/incl. battery Between 20 – 150 kg	Max speed: 70 kts; 400ft AGL <500m distance from pilot	>150m from buildings >100m from people

Tabella 2: Requisiti normativi negli Stati europei [3]

MTOW: maximum take-off weight; AGL : above ground level;

VLOS: visual line of sight;

BLOS: beyond visual line of sight.

1.3.2 Problema 2

Il secondo problema evidenziato dai report JARUS riguarda la burocrazia: in Europa tutte le operazioni con gli APR richiedono un'autorizzazione speciale, ad eccezione di alcune operazioni a basso rischio con APR di peso contenuto, in alcuni Stati membri che hanno introdotto una regolamentazione generica.

Le autorizzazioni individuali richieste agli organi nazionali competenti, nella maggior parte dei casi non forniscono con chiarezza dati circa le specifiche e la durata del permesso che viene richiesto. Il richiedente semplicemente non sa esattamente se la sua specifica operazione sarà approvata e l'eventuale concessione può richiedere da settimane a mesi per l'accoglimento, a seconda della complessità dell'operazione; gli operatori pertanto, si trovano spesso in difficoltà nel tenere in "sospeso" un privato che richieda una concessione per lungo tempo prima di essere in grado di concludere o eseguire una pratica. Inoltre, essendo il numero delle operazioni degli APR e dei suoi operatori in continua crescita, le autorità avranno in futuro ancora più difficoltà ad affrontare il numero sempre maggiore di domande in assenza di personale addizionale addestrato, addestramento che già da sé contribuirebbe e non poco ad un ulteriore ritardo.

Per quanto riguarda invece il costo degli Attestati come pilota SAPR, alcuni Stati come Francia, Malta o Spagna, non richiedono alcuna somma di denaro agli operatori per ottenere il permesso o addebitano prezzi piuttosto contenuti, ad esempio in Svizzera, dove le tasse sono legalmente limitate a 700 SF (circa 642 euro) o in Svezia, dove le tariffe per un'approvazione ammontano a circa 3.800 SEK (circa 380 euro). Molto diverso è invece il discorso per quanto riguarda per esempio i Paesi Bassi: un certificato di aeronavigabilità olandese costa 4.640 euro (rinnovo a 928 euro), un certificato di operatore costa 1.856 euro (rinnovo a 232 euro) e l'approvazione di una scuola di formazione costa 825 euro.

In Italia per poter ottenere l'Attestato di Pilota APR sono necessari circa 1000/1500 euro a seconda delle regioni, a cui devono necessariamente aggiungersi l'iscrizione al registro ENAC (94 euro), eventuali Attestati per operazioni critiche e richiesta di NOTAM alle autorità competenti per il sorvolo di città (94 euro).

In generale, si può comunque dire che le aziende non presentino lamentele circa gli importi addebitati, nel caso in cui gli stessi siano addebitati una sola volta; il costo reale è purtroppo legato alle numerose ore di lavoro necessarie per produrre i documenti necessari, come un manuale operativo o un manuale di gestione della sicurezza, soprattutto se questi documenti devono essere personalizzati per ciascuno Stato membro. I costi per sviluppare un manuale per una regolamentazione specifica possono essere stimati in circa 6.000 euro (basati su 80 ore a 75 euro/ora); per un manuale di sicurezza e manutenzione a circa 12.000 euro (basato su quattro settimane lavorative a 75 euro/ora). Sono soprattutto la molteplicità di norme e alle volte la loro difficile interpretazione a far lievitare i costi per le aziende.

1.3.3 Problema 3

Il terzo macro-problema è legato in qualche modo sempre all'ambito legislativo e consiste nel fatto che spesso le regole esistenti che disciplinano l'aviazione civile, mal si prestano ad essere applicate nello specifico al mondo degli APR. All'intero delle regole esistenti, il pilota a bordo risulta fondamentale per la sicurezza delle operazioni. Non esiste alcuna definizione di "pilota remoto" né di "stazione di terra", il che significa che gli APR non sono in grado di soddisfare le attuali norme di sicurezza.

In termini di navigazione, le operazioni con APR non sono vincolate dagli aeroporti, che sono in effetti punti fissi specifici di entrata e di uscita dallo spazio aereo. Diversi tipi di APR sono in grado di volare da pochi metri da persone o proprietà, fino a distante molto grandi, nell'ordine dei 15-25 km. Le regole europee dell'aria non regolano i voli civili o commerciali al di sotto dei 500 piedi (circa 150 metri), esattamente dove gli APR più piccoli operano intensamente o dove anche gli APR più grandi sono più presenti, dato che il loro decollo o atterraggio non sono ovviamente limitati agli aeroporti tradizionali. Le operazioni inferiori a 500 piedi non sono sistematicamente regolamentate nelle norme nazionali e sono riservate principalmente a missioni speciali di aeromobili leggeri ed elicotteri con i quali gli APR potrebbero facilmente interferire in assenza di regole precise.

In questo scenario cambia molto anche la percezione del rischio: la classica aviazione con equipaggio è considerata sempre rischiosa, in quanto almeno il pilota è a rischio in caso di incidente, mentre nel caso di APR e in particolare di quelli più piccoli, la maggior parte degli incidenti comporterebbe solo la perdita della macchina o per lo più danni materiali. La lacuna riscontrata in questo caso riguarda il <u>rischio per gli</u> <u>altri</u>, siano essi persone o altri velivoli operanti nello spazio aereo. Tale rischio può essere evitato semplicemente occupando spazi aerei differenti ma nel caso di spazio comune i potenziali fattori di rischio devono essere attentamente analizzati al fine di identificare i contributi più rilevanti e pericolosi per decidere appropriate misure di

"mitigazione" del rischio. D'altro canto è chiaro ed evidente come il livello di rigore applicato alla gestione della sicurezza dell'aviazione generale, la quale comporta severi controlli sulla progettazione, produzione e manutenzione di aeromobili, piloti e operazioni, risulti sproporzionato rispetto al rischio rappresentato da molte operazioni con APR.

In ultimo luogo si registra inoltre un forte "distacco" tra aziende produttrici di APR (specie grandi aziende cinesi, DJI in primis) e i diversi enti di aviazione civile; essa infatti ha coinvolto un numero relativamente limitato di organizzazioni specializzate, sia nella produzione che nelle operazioni. Questa separazione tra i due ambiti fa in modo che l'approccio normativo non sia intrinseco ma sia a corollario e quindi non riesca a seguire da vicino la crescita esponenziale che questo mondo sta vivendo negli ultimi tempi. Si può benissimo dire che il funzionamento semplice e il costo sempre più contenuto dei droni, dia la possibilità a quasi tutti di diventare utenti dello spazio aereo, ma non si può presumere che tutti gli attori abbiano una forte cultura aeronautica e siano consapevoli delle conseguenze sulla sicurezza delle loro azioni.

Le carenze in ambito legislativo si possono trovare non solo all'interno del regolamento di base sulla sicurezza aerea CE 216/2008 ma anche in molti altri strumenti giuridici [5]. In base alla normale applicazione delle norme in materia di inchieste su incidenti o segnalazioni di incidenti, un incidente tra due APR aprirebbe un'indagine completa e costosa, e la segnalazione di un qualsiasi incidente, anche piccolo, da parte di un pilota imporrebbe allo stesso un onere burocratico eccessivo.

1.3.4 Problema 4

Ultimo ma non meno importante è il problema della supervisione e la mancanza di informazioni e strumenti da parte delle forze dell'ordine.

Mentre ad oggi le operazioni con APR di dimensioni considerevoli ricadono sotto i meccanismi convenzionali di applicazione dell'aviazione gestiti principalmente dalle autorità nazionali dell'aviazione civile, quelle effettuate con APR di dimensioni più contenute portano a un'altra serie di sfide per le autorità di controllo. Questo problema è stato evidenziato quando un certo numero di APR ha sfiorato le centrali nucleari francesi o il centro di Parigi; ma si segnalano nuovi casi quasi ogni giorno, ultimo l'avvistamento da parte di un pilota British Airways di un APR ad un'altezza di circa 1 km, durante le fasi di atterraggio all'aeroporto di Torino Caselle. Gli APR si trovano inoltre anche su spiagge affollate, causando problemi di sicurezza umana e ambientale, oltre che di privacy.

Il problema attuale è che non esistono strumenti comuni per prevenire le violazioni in modo automatico e le forze di polizia non hanno mezzi per far rispettare la corretta applicazione delle regole. Inoltre, nel caso si verifichi un incidente, le autorità di controllo incontrano problemi con l'identificazione dell'operatore e l'applicazione della responsabilità all'operatore - laddove il drone non abbia targa o altri mezzi di identificazione oppure laddove l'operatore non disponga di un'assicurazione sufficiente o voli illegalmente. Questi problemi non si presentano nell'aviazione civile in generale: tutti gli aeromobili sono registrati e i controlli stabiliscono la conformità alle regole e i requisiti; gli operatori non conformi possono essere fermati in aeroporto. A tutto ciò si aggiunge il fatto che non vi siano specifici requisiti per gli APR prima dell'immissione sul mercato come per esempio:

- sistemi che permettano l'identificazione;
- dispositivi di sicurezza;
- sistemi di comunicazione/intercettazione;
- geofencing.

Dal momento che quella degli APR è una realtà nuova e in continua evoluzione, risulta necessario "creare" esperienza su come applicare le norme esistenti in materia di sicurezza, protezione dei dati e privacy, sicurezza e protezione ambientale o responsabilità/assicurazione. Le linee guida spesso non sono disponibili e coloro che sono impegnati in operazioni con APR hanno una conoscenza spesso per nulla sufficiente delle regole.

1.3.5 Possibili scenari

Una volta analizzate le principali problematiche legate al mondo degli APR, vengono evidenziati 3 diversi scenari futuri che potrebbero vedere la luce a breve:

 <u>Scenario base 0</u>: le norme sulla sicurezza degli APR sarebbero sviluppate sulla base dell'attuale divisione dei compiti tra l'Unione Europea e le autorità nazionali. EASA sarà competente a preparare norme dettagliate solamente per gli APR di grandi dimensioni che superino i 150 kg; gli Stati membri di JARUS rimangono responsabili della regolamentazione e della certificazione degli APR al di sotto di tale soglia.

2.Scenario 1: estensione del Regolamento aereo convenzionale dell'Unione Europea a tutti gli APR. Si tratterebbe di andare ad applicare direttamente le norme vigenti per l'aviazione civile integrandole con le procedure di certificazione e autorizzazione esistenti. Questo procedimento porterebbe quindi a modifiche legislative per estendere l'attuale "portata" del Regolamento CE 216/2008 a tutti gli APR di qualunque peso. I "requisiti essenziali" elaborati per l'aviazione con equipaggio sarebbero adattati alle operazioni con APR (per coprire aspetti specifici come il pilotaggio remoto) e inclusi nel regolamento modificato, comprese le norme e le procedure relative alla certificazione dell'aeromobile. alla certificazione dell'operatore е alrilascio dell'autorizzazione pilota. In tal modo interesserebbe tutte le società coinvolte nello sviluppo e nella progettazione degli APR, compresi gli sviluppatori di software o le società di manutenzione, e tutto il personale che si occupa di operazioni con APR, inclusi fornitori o ispettori.

Seguendo questo scenario, l'EASA preparerebbe documenti specifici riguardanti tutti gli aspetti delle operazioni con APR, dopodichè la Commissione potrebbe adottarli come norme dettagliate eventualmente modificabili in modo flessibile per riflettere l'evoluzione della tecnologia. Tra questi ci sarebbe la cosiddetta "Base di Certificazione" che andrebbe a definire gli standard di progettazione che gli APR devono soddisfare per ottenere un certificato di omologazione. Ogni produttore avrebbe quindi l'obbligo di richiedere ed ottenere un certificato prima di immettere un drone sul mercato. Le autorità aeronautiche nazionali assicurerebbero un'adeguata sorveglianza controllando i certificati e le licenze di esercizio, emessi sulla base di norme comuni. Tutti i produttori e gli operatori sarebbero noti alle autorità e le informazioni sulla sicurezza pertinenti, come i database sugli operatori degli APR, potrebbero essere messe a disposizione delle autorità preposte alla tutela della privacy e delle forze di sicurezza.

3. <u>Scenario 2</u>: la Commissione, con l'aiuto dell'EASA, svilupperebbe delle modifiche al Regolamento CE 216/2008 tale da includere un approccio operativo legato agli APR, integrandoli nel sistema aeronautico dell'Unione Europea. Rispetto allo Scenario 1, in questo caso si andrebbe a privilegiare l'aspetto legato alrischio dell'operazione. Ciò consentirebbe una differenziazione all'interno della normativa tra operazioni a basso rischio e i rischi legati ad operazioni equivalenti al trasporto aereo "manned", e quindi a regole proporzionate e metodi "scalabili" per dimostrare che le regole siano rispettate. Questo approccio è già stato sviluppato da JARUS e introdotto in alcuni Stati membri come Austria, Finlandia, Svizzera, Regno Unito e Francia. Come nello scenario precedente, anche in questo caso sarebbe necessario provvedere ad una certificazione formale e quindi al rilascio delle licenze da parte delle autorità aeronautiche. Per le operazioni che comportano rischi più elevati, le regole e le procedure sarebbero gradualmente ridimensionate in base alla valutazione del rischio dell'operazione.

Capitolo 2

Requisiti dell'APR e scenario operativo

2.1 Requisiti

All'interno del "parco macchine" aziendale presente in Pro S3, compaiono sia APR ad ala rotante che ad ala fissa anche se i modelli più studiati e testati risultano sicuramente quelli ad ala rotante, i cosiddetti "multicotteri"; la tipica configurazione è a quadricottero, con i 4 motori che vengono montati in modo tale che l'elica possa essere all'occorrenza traente, soluzione preferibile, o spingente [6].

Nel sito internet aziendale vengono spiegate nel dettaglio le caratteristiche degli APR sopracitati; si evidenziano in particolare le categorie "Multirotori Venture" e "Velivoli". Tra i prodotti appartenenti alla prima categoria figurano:

- IDroni Venture: realizzato in esclusiva per il negozio IDroni;
- Venture Trend: versione base;
- Venture Surveyor: versione più evoluta e presente in due varianti: Mapper e Inspector;
- Venture T: addestratore per scuole di volo.

All'interno della seconda categoria troviamo invece il Wavesight, configurabile in base alle missioni da portare a termine. Tutti gli APR sopracitati verranno discussi insieme alle loro principali caratteristiche e utilizzi nel capitolo 3, destinato alla ricerca di mercato.

Nella realtà aziendale di cui ho preso parte, ma si presume in molte altre realtà, nasce l'esigenza di creare un prodotto ibrido, senza la complicazione di un sistema di tilt dei motori, ma che comunque possa garantire un range che si collochi tra APR ad ala rotante e quello ad ala fissa, e un'efficienza importante specie e soprattutto durante il volo traslato. Se si considera che un APR ad ala rotante abbia un range intorno ai 5 km e uno ad ala fissa di mediamente 20/30 km (dato molto vago dal momento che vari produttori definiscono valori molto diversi e discordanti), la soluzione che verrà studiata dovrà avere all'incirca 10 km di range. La configurazione scelta sarà con motori ad asse fisso verticale (o inclinato di qualche grado) per cui per garantire una buona efficienza nel volo traslato, sarà necessario che l'APR presenti una superficie il più possibile aerodinamica e sia dotato di superfici tali da produrre portanza e risparmiare potenza ai motori, prolungando l'autonomia data dalla batteria che verrà adottata.

Vengono quindi identificati i primi due requisiti:

- 1. Capacità di percorrere lunghe distanze 10 km indicativamente;
- 2. Capacità di stare in volo per un tempo prolungato, superiore ai 60 minuti.

Si renderà necessaria un'approfondita analisi aerodinamica, che verrà preliminarmente svolta in ambiente SolidWorks e precisamente con Flow Simulation, e che successivamente dovrà essere approfondita e perfezionata. Il problema principale di questa analisi non sarà tanto trovare spazio all'interno del corpo dell'APR per tutte le componenti interne, quando bensì allocarle nel modo migliore possibile; i motori e di conseguenza le eliche, in particolar modo, richiederanno uno studio di ottimizzazione.

Dal momento che alla macchina è richiesto di essere efficiente nel volo traslato, i motori dovranno girare ad un numero di RPM inferiore rispetto al semplice hover, e il resto della portanza necessaria sarà ovviamente dato dalla forma portante dell'APR stesso; l'idea che dovrà essere sviluppata sarà di fatto quella di un APR ad ala fissa ma con i 4 motori ad asse verticale. Bisognerà quindi dotare il corpo di un'ala con opportuno profilo e grandezza per permettere di avere il valore più alto di portanza anche a basse velocità. Per tutti questi aspetti, l'analisi aerodinamica e i suoi step preliminari di disegni CAD saranno di notevole importanza e occuperanno una parte molto rilevante del progetto finale. Si partirà analizzando la configurazione base di un APR già esistente, il Venture, e da questo si andranno ad analizzare migliorie da apportare per raggiungere gli scopi prefissati. Saranno studiate diverse configurazioni che porteranno quindi alla soluzione finale, quella giudicata ottimale poiché la migliore risposta ai requisiti.

A rendere più stringente il campo di studio, un terzo requisito sarà quello di rispettare un certo peso massimo al decollo di circa 4 kg, 40 N. Questa limitazione è già stata evidenziata nel capitolo 1, relativo al Regolamento e alla Circolare: al di sotto dei 4 kg di peso massimo al decollo, è possibile pilotare la macchina con il solo Attestato "base", definito dalla prima categoria. Questo requisito porta quindi almeno ad una semplificazione per quanto riguarda gli Attestati da conseguire, non richiedendo corsi di categoria superiore.

L'aspetto del peso evoca e anticipa il quarto requisito che il progetto dovrà perseguire: l'uso di nuovi materiali e nuove tecniche costruttive per realizzare forme più o meno complesse che abbiano un'utilità dal punto di vista aerodinamico ma anche e soprattutto strutturale.

L'avvento di nuove tecnologie costruttive e di nuove materiali apre la strada a nuove ed interessanti soluzioni, fino a qualche anno fa difficilmente realizzabili. Basti pensare all^{*}'additive manufacturing'', fino a poco tempo fa sconosciuto ai più: ora esistono aziende in grado di "stampare" direttamente il componente progettato al pc, senza bisogno di comprare macchinari voluminosi ma più che tutto sicuramente molto costosi. Già solo questa possibilità, riesce ad offrire alle aziende delle soluzioni importanti e vantaggiose per riuscire a compiere ancora uno step ulteriore nello sviluppo di questo nuovo mondo legato agli APR.

L'"additive manufacturing" stesso si è evoluto molto, sono state sviluppate nuove tecniche per arrivare al prodotto finito e questo ha permesso di introdurre una vasta gamma di nuovi materiali con cui andare a realizzare il componente studiato e costruito dietro un monitor.

Il quarto requisito sarà quindi caratterizzato da un'ampia ricerca di materiali esistenti e nuove tecnologie di fabbricazione dei componenti, il tutto corredato da una parte più sperimentale, legata allo svolgimento di prove strutturali, eseguite mediante il tool "Simulation" di SolidWorks che di fatto andrà a validare o meno il modello perché successivamente possa risultare idoneo alla costruzione e quindi infine alle prove di volo.
Come si può notare, i 4 requisiti evidenziati nello sviluppo di un progetto di questo tipo, risultano ben delineati e soprattutto mostrano comunque una certa sequenzialità nonostante costituiscano problemi molto legati gli uni agli altri. È normale considerare il fatto che, trattandosi di uno studio inizialmente preliminare, sarà possibile e alle volte necessario fare un passo indietro, rivedere alcune assunzioni prese per buone in qualche step precedente. Questo è di fatto il compito e l'obiettivo finale che ci si propone in un elaborato di questo tipo.

I vari step possono essere così riassunti nel seguente diagramma:



2.2 Scenario operativo

Come già detto in precedenza specificando i requisiti, l'APR che si vuole progettare intende essere una sorta di ibrido tra il classico multicottero ad ala rotante e il velivolo ad ala fissa, pur mantenendo gli assi dei 4 motori verticali.

Parlando di quelli che possono essere gli scenari operativi, l'APR ad ala rotante può essere indicato per operazioni di precisione, quali per esempio agricoltura, fotogrammetria e rilievo, ma il suo stesso peso e l'autonomia delle batterie, fanno in modo che non possa godere di un tempo di volo molto ampio; questo fattore in particolare lo "obbliga" a rimanere relegato ad una distanza non particolarmente considerevole rispetto al punto di decollo. Molto diverso invece è il discorso per quanto riguarda gli APR ad ala fissa: essi godono di un range e di un'autonomia, grazie all'efficienza del volo traslato, non indifferente; queste caratteristiche gli permettono di realizzare missioni molto lunghe sia in tempo che in spazio, andando anche a distanze di decine di km. Il problema principale sorge al momento del decollo e dell'atterraggio: dal momento che si comportano di fatto come un vero e proprio velivolo hanno bisogno di una superficie piana e lunga su cui muoversi per poter prendere velocità o decelerare. In altri casi, per il decollo può essere prevista una catapulta, che però va a complicare eccessivamente il progetto e compromette in maniera importante anche la portabilità.

Nel caso di APR ibridi, a metà strada tra ala fissa e rotante, dotati di motori tiltabili, il progetto va ulteriormente complicandosi; questa risulta quindi un'opzione da scartare a meno che sia espressamente richiesta da un potenziale cliente.

Di seguito vengono illustrati i principali scenari operativi in cui è possibile trovare impiegato un APR sia esso ad ala rotante o ad ala fissa, definiti nei documenti "Mezzi aerei a pilotaggio remoto, centri di addestramento e attestati pilota" di ENAC del 16/09/2016 e "Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto di classe MINI per le esigenze di impiego di prossimità dell'Arma dei Carabinieri" del Comando Generale dell'Arma dei Carabinieri del 03/2018 [7] [8]:

- 1. videoriprese aeree a scopo scientifico, tecnico, pubblicitario (marketing territoriale), cinematografia o tv (foto e video in 3D o termiche);
- ispezioni di siti industriali, infrastrutture e sviluppo di nuove tecnologie per la conoscenza del territorio e dell'ambiente (city sensing e near mapping). Rilevamenti geo-topografici e ambientali attraverso sensori multi-spettrali;
- 3. fotogrammetria/telerilevamento/mapping in luoghi di interesse naturalistico, culturale, artistico e storico. Indagini con ricostruzioni 3D su zone archeologiche o su aree colpite da disastri naturali;
- 4. attività di addestramento, ricerca/sviluppo, sorveglianza/sicurezza e dimostrazione applicativa degli APR anche tramite sensori IR;
- ispezione su cabine della distribuzione di energia elettrica, antenne per telefonia mobile e ponti stradali/ferroviari;
- 6. supporto a operazioni SAR (Search and Rescue), supporto investigativo, pattugliamento costiero e NAV AIDS Flight Calibration Experimental Testing;

- 7. monitoraggio di esondazioni/alluvioni, frane, geolocalizzazione di incendi boschivi, verifica dissesto idrogeologico/frane e rilevazione discariche;
- 8. censimento infrastrutture esistenti (linee elettriche, telefoniche, fognature, gasdotti, metanodotti, tracciati stradali/ferroviari), monitoring di campi eolici/fotovoltaici, ispezione/verifiche criticità di manufatti e opere d'arte;
- 9. disgaggio valanghe;
- 10. missioni ISR (identificazione mezzi e persone, riconoscimento, lettura targhe, inseguimento).

Come detto in precedenza, le peculiarità dei due diversi tipi di APR fanno in modo che si possano identificare per ognuno delle missioni "preferibili" o "consigliate", nonostante la grande maggioranza sia comune ad entrambi.

Chi sceglie in genere un APR ad ala rotante, ha bisogno di effettuare operazioni che richiedano un certo livello di precisione e dettaglio, con soste su punti specifici o movimenti lenti e non continui. Per converso, un APR ad ala fissa può essere utile per missioni a lungo raggio e che non richiedano un grado di dettaglio elevato a livello fotografico; questa soluzione può essere preferibile laddove si debba raggiungere un obiettivo molto lontano e farlo nel più breve tempo possibile. Risulta ovviamente impossibile il volo in hovering e le operazioni ad esso connesse.

Proprio da queste distinzioni e da queste peculiarità nasce l'intento di creare un prodotto che unisca i vantaggi di entrambe le categorie, cercando di minimizzare le problematiche e gli svantaggi.

Volendo rendere questo prodotto il più completo possibile in modo che possa essere utilizzando per vari scopi, verranno delineati diversi scenari in cui possa trovare applicazione e infine verrà discusso un profilo di missione generico, così come viene delineato per i velivoli di dimensioni più importanti.

Tra le missioni in cui poter utilizzare l'APR sopra discusso possiamo annoverare:

- 1. Search and Rescue: possibilità di volare per qualche km alla ricerca di eventuali dispersi, sia su terra che su acqua;
- 2. Prevenzione e contrasto fenomeni naturali, quali incendi, frane, terremoti, eruzioni vulcaniche;
- 3. Ispezioni di infrastrutture sensibili o siti industriali.

Questi citati, sono solamente 3 esempi in cui poter trovare applicazione per il particolare tipo di APR di cui si parlerà nel dettaglio in seguito. È normale che le missioni a cui possa prestarsi siano molteplici e molte di più di quelle descritte: queste sarebbero semplicemente quelle preferibili per sfruttarne appieno i vantaggi e quindi identificare bene i migliori scenari.

I potenziali clienti di questa soluzione vengono identificati soprattutto negli organi di polizia, piuttosto che protezione civile o guardia costiera, impegnati negli ambienti descritti in precedenza.

2.3 Profilo di missione

All'interno di questa sezione viene discusso il profilo di missione dell'APR oggetto di studio. Tale trattazione non può prescindere dal considerare inizialmente un APR multirotore generico, al fine successivamente di mostrarne le caratteristiche di differenza tra le due soluzioni.



Figura 1: Profilo di missione di un semplice multicottero

Come si evince dalla figura 1, il profilo di missione di un APR ad ala rotante risulta particolarmente semplice: dopo una prima fase di climb verticale, fino ad una quota di circa 150 metri, vi è una fase di hover e successivamente due di cruise di circa 2 km intervallate da circa 30 minuti di loiter, utili per realizzare operazioni di precisione e adatta all'impiego dei sensori montati a bordo dell'APR. Una volta raggiunto lo scopo e ritornato al punto di decollo, l'APR può gradualmente scendere di quota e atterrare verticalmente. L'obiettivo nella nuova configurazione sarebbe quello di aumentare il tempo a disposizione in loiter e avere una fase di cruise più efficiente, che possa permettere una più grande autonomia e un margine di range più elevato.

Per l'APR oggetto di studio si prevede di realizzare un profilo di missione molto simile a quello mostrato in precedenza ma con alcune particolarità vicine agli APR ad ala fissa.



Figura 2: Profilo di missione della nuova configurazione

Di seguito viene riassunto il profilo di missione attraverso le principali fasi di volo:

- 1. <u>Climb</u>: fase di salita che avviene inizialmente in verticale, per poi diventare un moto traslato in salita. L'APR si porta quindi gradualmente alla quota in cui svilupperà la fase successiva, quella di crociera. È previsto un rateo di salita di circa 2.5 m/s durante la prima fase verticale e di circa 1-1.5 m/s nella successiva traslata, da superare solo nel caso in cui vi sia la necessità di un decollo particolarmente repentino.
- 2. <u>Cruise</u>: fase di accelerazione e di raggiungimento dell'obiettivo. La velocità in questa fase sarà variabile, vi sarà un'iniziale accelerazione fino alla velocità desiderata (25/45 km/h), una fase di velocità costante e infine una decelerazione fino al raggiungimento dell'obiettivo.
- 3. <u>Loiter</u>: una volta acquisito l'obiettivo, l'APR esegue delle rotazioni attorno ad esso o staziona in hovering. In questa fase, data la bassa velocità, è possibile sfruttare al meglio i sensori presenti a bordo dell'APR, per esempio per fotografia, identificazione, ecc.
- 4. <u>Cruise</u>: fase di ritorno o di raggiungimento dello spazio di atterraggio.

5. <u>Descent</u>: una volta in prossimità del punto di atterraggio, si procede alla fase di discesa con un certo rateo e sfruttando le superfici alari per realizzare una sorta di planata, a motori accesi. L'ultimo tratto di discesa è realizzato semplicemente in verticale, atterrando quindi nel luogo desiderato poggiando sull'apposito carrello.

Attraverso gli studi aerodinamici successivi, si dovrà trovare l'angolo di calettamento a cui porre le superfici alari per fare in modo di ottenere la miglior portanza ad una certa data velocità. Ciò permetterà quindi di risparmiare energia e volare più a lungo. Dal momento che i profili alari non saranno paralleli al flusso ma mostreranno un certo angolo di calettamento, durante il volo in hovering l'APR mostrerà un'angolazione non ottimizzata. Di tutto ciò si parlerà in dettaglio nel capitolo 4, riguardante l'analisi aerodinamica.

Capitolo 3

Ricerca di mercato e applicazioni

3.1 Panoramica APR ala rotante e ala fissa

Contrariamente a quanto si possa pensare, nonostante la diffusione degli APR sia relativamente recente, i produttori di questa tecnologia sono innumerevoli; la facilità di costruzione di una macchina di questo tipo non richiede grandissima esperienza ragion per cui anche il singolo è in grado di costruire il proprio APR. A tal proposito esistono su Internet molti forum con le istruzioni passo-passo per riuscire nell'intento. Scopo di questo capitolo è analizzare i prodotti presenti sul mercato, per avere una panoramica abbastanza ampia di quello che il consumatore può trovare. Tale analisi sarà anche utile per andare a valutare gli aspetti che possono essere migliorati ed affinati in entrambe le categorie, ala rotante o fissa, al fine di trovare più configurazioni che possano essere analizzate e utilizzate per l'APR oggetto di studio in questa Tesi. Poiché tale APR risulterà un "ibrido" tra le due categorie, sarà importante valutarle entrambe e trovarne il giusto compromesso.

Di ogni APR trovato, verranno mostrate le principali caratteristiche, quali soprattutto dimensioni, peso e autonomia.

3.1.1 Ala rotante

	Costruttore	N. rotori	Dimensioni	Peso	Max speed	Autonomia
Venture	Pro S3 s.r.l	4	477*477*307	3.5 kg	$45 \mathrm{~km/h}$	$30 \min$
RICOPTER-M	Riegl	8	1920*1820*470	30 kg	$30 \ \mathrm{km/h}$	$30 \min$
M600	Embention	6	900*900*300	6.3 kg	$80 \ \mathrm{km/h}$	36-60 min
X-STAR PREMIUM	Autel	4	350*350*250	1.6 kg	60 km/h	$25 \min$
OCTOPUSH	Airborne Concept	8	/	8 kg	$45 \ \mathrm{km/h}$	$30 \min$
EAGLE XF	UavAmerica	4	1800*1800*500	15 kg	40 km/h	60 min
MD4-200	Microdrones	4	540*540*300	1.1 kg	$30 \mathrm{~km/h}$	$30 \min$
MD4-1000	Microdrones	4	1030*1030*300	6 kg	$45 \mathrm{~km/h}$	$45 \min$
MD4-3000	Microdrones	4	2052*1888*300	16 kg	$70 \ \mathrm{km/h}$	$45 \min$
TITAN X8	Xdrones	8	1668*1518*759	12.5 kg	$50 \ \mathrm{km/h}$	25-41 min
AIR	DJI	4	168*184*64	$0.43 \mathrm{~kg}$	$68 \ \mathrm{km/h}$	20 min
MAVIC PRO	DJI	4	335*335*83	0.74 kg	$65 \ \mathrm{km/h}$	30 min
PHANTOM 4	DJI	4	350*350*250	1.4 kg	$72 \mathrm{~km/h}$	30 min
INSPIRE 2	DJI	4	605*605*300	4 kg	$94 \ \mathrm{km/h}$	23-27 min
HERCULES 5	DroneVolt	4	700*700*600	3.8 kg	/	30 min
HERCULES 10	DroneVolt	8	700*700*600	16.6 kg	$72 \ \mathrm{km/h}$	40 min
LE 4-8 X Dual	Xamen Technologies	8	310*245*300	8 kg	$12 \ \mathrm{km/h}$	15-25 min
D-600	Pentax	6	980*980*530	6.5 kg	$70 \ \mathrm{km/h}$	$25 \min$
SKYRANGER R60	Aeryon	4	/	2.4 kg	/	$50 \min$
SKYRANGER R80	Aeryon	4	/	4.5 kg	$50~{ m km/h}$	$50 \min$
SUPERFOX6	Heliceo	6	/	10 kg	$50 \ \mathrm{km/h}$	$43 \min$
HYDRA-12	AltiGator	12	/	20 kg	$45~\rm{km/h}$	$25 \min$
FOX-C8 XT	AltiGator	8	/	15 kg	$45~\rm{km/h}$	44 min
KAYRYS GYRO- X8	SlidX	8	/	/	$120 \ \mathrm{km/h}$	$60 \min$
R4 INDUSTRIAL	R4Robotics	4	1960*1960*603	10 kg	$50 \ \mathrm{km/h}$	$60 \min$
R4	R4Robotics	6	1000*1000*492	6.4 kg	$50 \ \mathrm{km/h}$	$45 \min$
AD2 SERIES	ActionDrone	4	980*980*450	$5.5 \ \mathrm{kg}$	$50 \ \mathrm{km/h}$	$45 \min$

FIREFLY	AscTec	6	605*665*165	1.6 kg	$55~{ m km/h}$	12-14 min
U130	Novadem	4	1300*1300*200	$3 \mathrm{kg}$	$35~{ m km/h}$	$20 \min$
XENA	OnyxStar	8	/	$5.6 \mathrm{~kg}$	$50~{ m km/h}$	$37 \min$
SPLASHDRONE	SwellPro	4	450*450*250	$3 \mathrm{kg}$	$60 \ \mathrm{km/h}$	$16 \min$
TYPHOON H PLUS	Yuneec	6	520*520*300	2 kg	$50~{ m km/h}$	$28 \min$
TORNADO H920	Yuneec	6	920*920*400	/	$50~{ m km/h}$	/
PLUS						
X4	BirdPilot	4	940*555*433	$5 \mathrm{kg}$	$50~{ m km/h}$	40-60 min
MULTICOPTER				_		
X8	BirdPilot	8	880*555*433	5 kg	$50 \ \mathrm{km/h}$	$30-45 \min$
MULTICOPTER	•	_		0	,	
SKYWALKER X62	South	6	1200*1200*400	5 kg	$45 \ \mathrm{km/h}$	40-50 min
ZX5	Trimble	6	850*850*490	5 kg	$40 \mathrm{~km/h}$	$20 \min$

Tabella 3: Analisi di mercato - APR ad ala rotante

3.1.2 Ala fissa

	Costruttore	N. rotori	Dimensioni Ap. alare	Peso	Max speed	Autonomia
WAVESIGHT	Pro S3 s.r.l	1	2300*1356	9.5 kg	70 km/h	30-150 min
UX11	Delair	1	800	1.4 kg	$54 \mathrm{~km/h}$	$60 \min$
UX5	Delair	1	1000	2.5 kg	60 km/h	$50 \min$
UX5 HP	Delair	1	1000	2.5 kg	$85 \mathrm{~km/h}$	$35 \min$
UX5 AG	Delair	1	1000	2.5 kg	80 km/h	$45 \min$
DT18 HD	Delair	1	1800*1200	2 kg	$61 \mathrm{~km/h}$	120 min
AVEM	Aeromapper	1	2130	2 kg	60 km/h	120 min
F300	Embention	1	3000	25 kg	50-120 km/h	180 min
W210	Embention	1	2120	4.7 kg	80-110 km/h	120 min
BAROUD'AIR	Airborne Concept	1	3000	25 kg	90-110 km/h	720 min
BRAMOR RTK	C-Astral	1	2300*960	4.5 kg	80 km/h	180 min
ATLAS	C-Astral	1	1550*820	2 kg	70 km/h	70 min

INTEGRATOR	Insitu	1	4800*2500	61.2 kg	$100 \ \mathrm{km/h}$	$1440 \min$
SIRIUS PRO	Topcon	1	1630*1200	2.7 kg	$65 \mathrm{~km/h}$	$50 \min$
FOXY	Heliceo	1	2000*2000	$5.5 \mathrm{~kg}$	120 km/h	$60 \min$
VIPER M-10	Saxon	1	3000*1830	4.5 kg	140 km/h	$120 \min$
M12 MONITOR	Saxon	1	3660*2640	16 kg	190 km/h	1920 min
REMOEYE – 002B	UconSystem	1	1800*1440	3.4 kg	80 km/h	$60 \min$
ASF 15	AeroSurveillance	1	2000	2 kg	80 km/h	$120 \min$
EASYMAP	Easymap	1	900*900*200	3 kg	$75~{ m km/h}$	$40 \min$
MASTERFLY	Easymap	1	1200*900*200	6 kg	$75 \mathrm{~km/h}$	$90 \min$
PD1	UKRSpec	1	4000	40 kg	/	$600 \min$
PENGUIN B	UAV Factory	1	3000	13 kg	80 km/h	$1200 \min$
FULMAR	Wake Eng	1	3000*1200*500	20 kg	100 km/h	360-720
	wake Eng.	1	5000 1200 500	20 mg	100 mm/ m	\min
CYBEREYE II	CyberFlight	1	/	60 kg	$160 \mathrm{~km/h}$	$600 \min$
SKYCRUISER	South	1	1500	3.5 kg	72 km/h	60-90 min
	Instruments	Ŧ	1000	0.0 10	12 Km/ II	50 50 mm

Tabella 4: Analisi di mercato - APR ad ala fissa

In questa trattazione non vengono affrontati gli APR definiti "ibridi", capaci di decollare e atterrare verticalmente con 4 motori ad asse verticale e di compiere il volo traslato con un motore ad asse orizzontale; rientrano in questa categoria anche gli APR dotati di motori "tiltabili", ovvero in grado di ruotare l'asse del motore di 90°, da verticale e orizzontale. Nonostante questa sia una soluzione molto valida e "pulita", risulta di complessità non indifferente e dal momento che un obiettivo da perseguire risiede nella semplicità costruttiva, questa soluzione viene tralasciata.

Nelle due tabelle precedenti 3 e 4, vengono mostrati i dati di alcuni APR presenti sul mercato, siano essi ad ala rotante o fissa. Nonostante sia stato analizzato un campione molto ampio, data la vastità del mercato è impossibile elencare tutti gli APR disponibili alla vendita.

Dalle tabelle è possibile comunque trarre importanti conclusioni:

 tra gli APR ad ala rotante e quelli ad ala fissa, non si riscontra una significativa differenza di peso;

- 2. gli APR ad ala fissa hanno dimensioni più importanti, sicuramente per quanto riguarda la larghezza, intesa come apertura alare: questo può inficiare negativamente la portabilità;
- 3. le velocità per gli APR ad ala fissa sono superiori;
- 4. le autonomie per gli APR ad ala fissa risultano di gran lunga superiori, attestandosi spesso a valori ben più alti dell'ora di volo.

L'efficienza del volo traslato con una configurazione ad ala fissa è chiara e questo permette di volare più lontano, più velocemente e per più tempo rispetto all'ala rotante. Nelle tabelle non sono stati indicati i range dei due tipi di APR per motivi semplici: molti costruttori non inseriscono questo dato perché influenzato dal tipo di missione e soprattutto dalla velocità. Partendo dal presupposto che per gli APR ad ala fissa le missioni siano spesso automatiche, essi mostrano un range di svariate centinaia di km; alcuni, anche grazie alle dimensioni e al peso, sono in grado di compiere dei voli transoceanici. Inserire un dato di questo tipo sarebbe stato particolarmente fuorviante e non molto utile per capire altre importanti differenze tra le due categorie.

3.2 Applicazioni

A differenza di quanto inserito nel capitolo 2, con gli scenari tipici in cui possono vedersi impiegati gli APR, lo scopo di questa sezione è analizzare nel dettaglio le principali missioni che vengono dichiarate dai costruttori all'interno delle brochure e che realmente avvengono, citando anche eventualmente gli organi coinvolti.

1. <u>Ricerca e soccorso</u>: l'APR viene alzato in volo e comandato in direzione dell'obiettivo, per stabilire il miglior modo per operare e soprattutto identificare la posizione della persona in pericolo. Questo tipo di operazione è condotta già da qualche tempo da parte della Croce Rossa [9].



Figura 3: Pro S3 – Venture in dotazione alla Croce Rossa Italiana [9]

2. <u>Ispezioni di infrastrutture e rilievi ambientali</u>: come ausilio alle normali operazioni realizzate con elicottero, l'APR viene utilizzato per compiere ispezioni periodiche a turbine eoliche, piuttosto che a tralicci ad alta tensione o dighe e anche per monitorare fiumi, frane, terremoti e altri fenomeni naturali. Impiegati in questo tipo di missione sono soprattutto Corpi di Stato quali Vigili del Fuoco e Protezione Civile [10].



Figura 4: APR destinato ad ispezioni e rilievi ambientali in dotazione ai VdF [10]

3. <u>Contrasto a reati</u>: in questo scenario l'APR è utilizzato per acquisire immagini e filmati di quanto succede in una determinata area, spesso utilizzando sensori ad infrarossi per il volo notturno oppure sensori atti a identificazione e inseguimento. Le modifiche all'ultimo Decreto Antiterrorismo (02/2015) introducono un emendamento proprio riguardante questo tipo di operazioni, legate ovviamente a Corpi di Polizia e Carabinieri [11] [12].



Figura 5: FlySecure, APR ad ala fissa della Polizia di Stato [11]

- 4. <u>Sorveglianza in grandi eventi</u>: sempre più spesso, durante grandi eventi e manifestazioni, quali concerti, cortei, corse cittadine, vengono utilizzati APR che svolgano azioni di sorveglianza da luoghi che altrimenti sarebbero decisamente non accessibili.
- 5. <u>Riprese aeree di eventi</u>: strettamente collegato al punto precedente, gli APR vengono utilizzati anche per riprese di ottima qualità durante eventi sportivi e non solo, in occasione di grandi raduni, matrimoni e gare di diversi sport. In questo caso in genere sono proprio gli organizzatori dell'evento a richiedere una ben specifica inquadratura per documentare il tutto; devono pertanto rivolgersi a ditte specializzate in riprese aeree. È il caso per esempio delle riprese al mondiale di Rally WRC di Alghero o al mondiale di sci a Madonna di Campiglio (con incidente per lo sciatore Hirscher).



Figura 6: DJI Inspire II durante riprese aeree sportive

6. <u>Agricoltura di precisione</u>: l'APR, sia ad ala rotante che ad ala fissa, provvisto di appositi sensori multispettrali, viene utilizzato sui campi per conoscere lo stato di salute delle piante, il grado di irrigazione del terreno e in generale lo stato delle colture [13].



Figura 7: Pro S3 - Wavesight utilizzato in agricoltura di precisione [13]

7. <u>Fotogrammetria</u>: tale applicazione, realizzata per mezzo degli APR, costituisce oggi la metodologia più veloce per il rilievo di una architettura grazie alla elevata velocità di acquisizione e all'immediata fase di elaborazione dei software. Le stesse tecniche vengono anche adottate nel campo dei Beni Culturali, al fine di ottenere in modo immediato informazioni metricamente precise, fondamentali per lo studio di strutture murarie o anche di piccoli reperti [14].



Figura 8: Esempio di rilievo fotogrammetrico [14]

8. <u>Spettacoli aerei</u>: questa applicazione rappresenta l'ultima frontiera dell'utilizzo degli APR (anche se in questo caso forse avrebbe più senso parlare di "droni"), ovvero il loro utilizzo per spettacoli di luci e colori, utilizzati nel caso della città di Torino in sostituzione dei fuochi d'artificio durante la festa del patrono San Giovanni [15] [16].



Figura 9: San Giovanni - spettacolo aereo nei cieli di Torino [16]

Capitolo 4

Configurazione aerodinamica

In questo quarto capitolo viene affrontato uno dei temi più importanti del progetto di Tesi: l'aerodinamica. Trattandosi di un APR di nuova concezione, questo permette ampio "raggio di manovra" nel ricercare nuove soluzioni che permettano di raggiungere e soddisfare i requisiti descritti all'interno del capitolo 2. Al momento sul mercato non esistono prodotti di questo tipo e questo dà modo di svincolarsi dalle soluzioni più comunemente utilizzate.

Nella prima sezione del capitolo verranno mostrati alcuni dati raccolti per quanto riguarda la configurazione base del multicottero ampiamente collaudato in azienda: il Venture. Da questa configurazione sarà utile andare a definire alcuni dati, importanti per comprendere la dinamica del volo e quindi adottare successivamente scelte adeguate al tipo di APR che verrà progettato. Di fondamentale importanza sarà quindi comparare le due soluzioni per mostrare i vantaggi riscontrati, soprattutto in termini di efficienza e di autonomia.

È importante ricordare che quello svolto sarà un semplice studio di avamprogetto e quindi la configurazione che verrà trovata necessiterà di più approfondite considerazioni di natura aerodinamica. Lo scopo di questa trattazione è andare a considerare la possibilità di realizzare un APR "ibrido" che si collochi tra l'ala rotante e l'ala fissa.

4.1 Acquisizione dati

Come detto in precedenza, l'APR di riferimento è il Venture, prodotto da Pro S3. Tale scelta è stata dettata dalla semplicità nel reperire i dati che verranno discussi nel seguito e dal fatto che la configurazione del nuovo progetto, seppur profondamente differente, ne presenterà alcune analogie.

Nel seguito vengono mostrate alcune immagini relative al Venture in modo da evidenziarne alcune caratteristiche importanti.



Figura 10: Dimensioni Venture - Pro S3 [6]



Figura 11: Vista isometrica renderizzata Venture - Pro S3 [6]

Il corpo del Venture, la fusoliera, è realizzato in materiale polimerico mediante prototipazione 3D, più comunemente nota come stampa 3D: una volta realizzato il modello in CAD e rispettate tutte le specifiche geometriche richieste dall'azienda produttrice, specie in termini di spessore, si procede con la stampa e con l'invio al cliente del componente. Tutto questo processo sarà descritto in dettaglio nel capitolo riguardante la scelta dei materiali.

All'interno della fusoliera sono presenti due piastre in carbonio su cui vengono agganciate/incollate tutte le componenti interne: esse costituiscono il vero e proprio scheletro dell'APR.

Di fondamentale importanza risultano anche i bracci dei motori: realizzati con un profilato di carbonio a sezione circolare, costituiscono la miglior scelta in termini di reperibilità, costi ed integrità. Esse sono agganciate alla fusoliera mediante una "baionetta" che permette di richiuderli nel caso si voglia riporre l'APR all'interno della sua valigia di trasporto. All'altra estremità dei bracci si trovano invece i 4 motori, ancorati mediante un apposito supporto, anch'esso realizzato in prototipazione 3D.

Oltre ai requisiti definiti all'interno del capitolo 2, risulta fondamentale andare a considerare alcuni dati legati all'assetto del Venture e quindi i relativi risultati prestazionali. Al fine di ottenere questi dati, sono stati eseguiti diversi test di volo presso il campo volo di Castellamonte e i dati di telemetria sono stati in seguito analizzati mediante l'ausilio del software Mission Planner.



Figura 12: Data log - sessione di volo

Questo grafico mette in relazione la velocità di volo dell'APR con l'angolo di beccheggio: durante il volo traslato in avanti, i motori posteriori generano una spinta maggiore di quelli anteriori facendo sì che il corpo del velivolo tenda a "picchiare", generando quindi un angolo di beccheggio negativo.

A tal proposito vengono proposti due "zoom" della schermata per capire bene la relazione che intercorre tra questi due parametri nel caso del Venture.



Figura 13: Data log-particolare a 4 m/s



Figura 14: Data log - particolare a 6 m/s

Nei grafici proposti, la linea di colore verde rappresenta la velocità dell'APR mentre quella di colore rosso l'angolo di beccheggio. Si nota immediatamente come la linea rossa presenti molte oscillazioni e abbia un andamento molto più frastagliato rispetto a quella rappresentante la velocità; questo si spiega dal momento che la velocità è un comando impartito dal pilota mentre l'angolo di beccheggio ne è la diretta risposta.

Nella prima immagine si ha una velocità di 3 m/s al quale corrisponde un angolo di circa 3°; nella seconda si ha la stessa proporzionalità e quindi 6 m/s a 6°. Nel grafico si ritrovano anche velocità superiori ma, dal momento che tali velocità sono state mantenute per un lasso di tempo particolarmente breve, risulta complicato andare a verificare con una discreta precisione l'angolo di beccheggio al quale si porta l'APR. Si può comunque stabilire una certa proporzionalità tra velocità e angolo; questa informazione risulta di grande importanza per studiare la configurazione aerodinamica dell'APR oggetto di studio. La relazione tra i due parametri evidenzia una corrispondenza 1 a 1 tra velocità di traslazione e angolo di beccheggio, mostrata in figura 15.



Figura 15: Inclinazione del mezzo alla velocità di 10 m/s

Un altro dato molto importante da considerare è l'autonomia: con una batteria 6S da 10000 mAh, l'autonomia massima del Venture si è attestata sui 50 minuti.

Questi dati elencati finora rappresentano caratteristiche che il Venture ha mostrato durante diverse prove di volo; purtroppo non sono comunque sufficienti per iniziare lo studio di una nuova macchina, ragion per cui è necessario che intervenga il CAD, grazie al quale si può andare ad indagare più a fondo, soprattutto per un altro dato che interessa notevolmente il progetto: la portanza. Già a pima vista, il Venture non mostra una forma ottimizzata al volo traslato, quindi ci si aspetta una portanza molto ridotta se non addirittura negativa. Questi calcoli preliminari vengono implementati nel solutore CFD di SolidWorks, Flow Simulation, strumento basico ma abbastanza efficace per avere un ordine di grandezza delle forze in gioco.

La validazione del software è avvenuta in collaborazione con il collega Daniele Modesti: parallelamente a questo progetto di Tesi, egli ha lavorato sull'"x8 Skywalker", un APR ad ala fissa, reso idoneo al volo verticale mediante l'aggiunta di 4 motori montati su appositi profilati realizzati in fibra di carbonio [17].



Figura 16: x8 Skywalker - versione base [17]



Figura 17: x8 Skywalker - versione modificata

Dal momento che questo APR risulta in commercio, è possibile trovare documenti che ne dimostrino il funzionamento e varie caratteristiche aerodinamiche. In particolare, nel documento "Aerodynamic modeling of the Skywalker X8 Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicle" è possibile trovare la curva del Cl/α dell'intero velivolo [18]. Quest'ultima è stata confrontata con i risultati ottenuti dal solutore FlowSimulation, riuscendo a delineare il grafico seguente:



Grafico 1: Confronto Cl/a e validazione FlowSimulation

Come si evince dal grafico, le curve delle configurazioni base e VTOL dell'x8 realizzate mediante interpolazione polinomiale con i dati ottenuti dal software, mostrano una pendenza simile a quella del velivolo testato in galleria del vento. Il discostamento massimo che si realizza è circa il 4%, un valore più che accettabile che va quindi a validare il software e i successivi risultati che verranno mostrati.

Per quanto riguarda l'APR base, il Venture, viene realizzata una griglia computazionale di circa 900000 celle e il calcolo restituisce, per una velocità di 10 m/s e con un angolo di beccheggio di 10°, -0.125 N, ossia una forza deportante; nulla di diverso da quanto ci si aspettava. È importante ricordare che in questa trattazione, per semplicità e snellezza dei calcoli, viene omessa l'interferenza dei flussi dei 4 rotori con l'APR.

Di seguito vengono riportate due immagini con rispettivamente la traiettoria del flusso e la distribuzione delle pressioni.



Figura 18: Flow trajectories -10° - Venture Pro S3



Figura 19: Cut plot -10° - Venture Pro S3

4.2 Configurazioni analizzate

Una volta acquisiti i dati relativi al Venture, è possibile studiare nuove soluzioni che permettano di perseguire i requisiti introdotti all'interno del capitolo 2.

Tra le molte idee e design considerati, prima di arrivare alla soluzione descritta nel proseguo del capitolo, sono state immaginate e disegnate in SolidWorks altre due diverse configurazioni che vengono brevemente descritte nel seguito: 1. La prima configurazione, mostrata in figura 20, nasce con l'intento di dotare un classico multicottero di due semi-ali. I vantaggi di questo progetto stanno nella sua semplicità realizzativa e nel fatto che in base alla missione possa essere utilizzato all'occorrenza come semplice APR ad ala rotante oppure in una versione "ibrida" e più performante nel volo traslato. Il grande problema è però costituito dall'ingombro, dal momento che il corpo centrale potrebbe essere assimilato ad un quadrato di 1 m di lato: una volta aggiunte le due semi-ali, l'apertura alare arriverebbe a più di 2 m, compromettendone quindi in maniera considerevole la portabilità.



Figura 20: Prima configurazione analizzata

2. La seconda configurazione si avvicina notevolmente a quelle che è quella definitiva. Come si può vedere dalla figura 21 però, il corpo centrale non è aerodinamicamente ottimizzato, il profilo alare scelto non è il migliore in termini di Cl e Cl/Cd e la superficie della semi-ala è abbastanza esigua. La forma si sta avvicinando alla configurazione finale ma risulta necessario rivedere e migliorare molti aspetti.



Figura 21: Seconda configurazione analizzata

4.3 Studio di configurazione

Una volta analizzati i pro e i contro delle precedenti configurazioni, per prima cosa è utile studiare un corpo centrale con un profilo che sia il più aerodinamico possibile; esso, nella condizione peggiore con un angolo di attacco di circa $-10/-12^{\circ}$, dovrà risultare poco influente e quindi generare poca resistenza e assenza completa di deportanza. La fusoliera, il corpo centrale dell'APR oggetto di studio, viene creata in SolidWorks e anche in questo caso le prove aerodinamiche vengono realizzate in ambito Flow Simulation. Nelle figure seguenti vengono mostrati la geometria e il campo di pressioni che si realizza davanti al corpo con un angolo di attacco di circa -10° , all'incirca corrispondente, come detto, ad una velocità di 10 m/s.



Figura 22: Fusoliera realizzata in SolidWorks



Figura 23: Flow trajectories sulla fusoliera



Figura 24: Cut plot - campo di pressioni su sezione di fusoliera

La forma del corpo centrale trae chiaramente spunto dalle geometrie tipiche dell'ala fissa: è affusolato e sottile, in modo da ottenere un'aerodinamica migliore e risulta inarcato, per favorire la depressione sul dorso. Le dimensioni del corpo sono state scelte in base all'alloggiamento interno di tutti i componenti, quali: batteria, autopilota, ESC o Herkules, dispositivi di comunicazione, sensori, ecc. La fusoliera pertanto si svilupperà soprattutto in lunghezza e in larghezza, rispettivamente per 70 e 40 cm. Il test è stato condotto ad un angolo di attacco di -10° ed è normale quindi la depressione si manifesti anche sul ventre; difficilmente, comunque, si andrà ad angoli di attacco ancor più negativi durante il volo traslato.

I valori che si ottengono a 10 m/s per quanto riguarda la fusoliera vengono riassunti in tabella 5:

Angolo di attacco [°]	Portanza [N]
-10	1.6
-5	2.5
0	3.7

Tabella 5: Valori di portanza al variare dell'angolo di attacco per la fusoliera

Ben più importante risulta la scelta del profilo alare e di tutti i parametri ad esso collegati: trattandosi di un progetto di nuova concezione, non si trovano parametri "standard" su cui poter fare affidamento e pertanto nel seguito verranno discusse le scelte adottate.

In primis è stato necessario trovare un profilo alare adeguato alle due semi-ali, che permettesse di avere un coefficiente di portanza Cl elevato: per avere a disposizione un numero di parametri adeguato, si è optato per i profili NACA a 4 cifre. All'interno del sito http://airfoiltools.com/, per diversi valori del numero di Reynolds, è possibile eseguire un confronto tra diversi profili aerodinamici. Vengono scartati i profili simmetrici, poiché la ricerca è rivolta verso un inarcamento che favorisca lo sviluppo di una depressione sul dorso dell'ala [19].

Per prima cosa è necessario calcolare il numero di Reynolds.

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

dove ρ è la massa volumica [kg/m³], ν la velocità macroscopica [m/s], d la lunghezza caratteristica, la corda del profilo in questo caso [m] e μ rappresenta la viscosità

dinamica [kg/(m*s)]. Inserendo nella formula i valori relativi alle grandezze in gioco si ottiene:

$$Re = \frac{1.225 \cdot 10 \cdot 0.4}{1.81 \cdot 10^{-5}} = 270718.232$$

Di seguito vengono mostrati dei grafici, rispettivamente Cl/α , Cd/α e Cl/Cd, di tre profili NACA differenti a parità di numero di Reynolds trovato: questi permetteranno l'identificazione del profilo adeguato.

Legenda colori			
Blu	NACA 6412		
Grigio	NACA 2410		
Azzurro	NACA 0010		

Tabella 6: Legenda colori curve Cl/a , Cd/a e Cl/Cd



Figura 25: Curve Cl/a [19]







Figura 27: Curve Cl/Cd [19]

Come risulta dai grafici sopra, il profilo NACA 6412, colorato di blu più intenso, risulta il migliore tra i tre considerati.

Per quanto riguarda la geometria, e quindi la corda, l'apertura alare, il calettamento, lo svergolamento e l'angolo di freccia, tali misure sono state acquisite in base all'"ingombro" del corpo centrale e considerando l'effettiva portabilità del mezzo:

- 1. <u>Corda alare</u>: affinché l'APR possa sviluppare una portanza considerevole, si estende per quasi tutta la sezione longitudinale.
- 2. <u>Apertura alare</u>: oltre a garantire un buon livello di portanza, le due semi-ali non devono presentare un ingombro eccessivo che ne pregiudichi la portabilità e il trasporto. Per questo motivo la semi-apertura alare è di 60 cm, così da essere simile alla lunghezza del corpo centrale.
- 3. <u>Calettamento</u>: quest'angolo è stato scelto considerando i file log derivanti dai test di volo eseguiti con il Venture: se a 10 m/s "corrispondono" circa 10° a picchiare, il calettamento dovrà essere sicuramente superiore per evitare delle zone di deportanza del profilo nel caso di volo traslato a velocità considerevoli. Non si potrà comunque scegliere un calettamento eccessivo, poiché le due semi-ali rischierebbero di generare più resistenza che portanza alle basse velocita.
- 4. <u>Svergolamento</u>: trattandosi di una semi-ala di dimensioni ridotte, adottare un angolo di svergolamento ha poco senso e non offre molti benefici. C'è il rischio inoltre che, nel caso si velocità sostenute, la parte della semi-ala vicino al tip sviluppi una deportanza. A questi due fattori va aggiunta anche la complessità costruttiva e il conseguente costo.
- <u>Freccia</u>: considerando il "panorama" di APR ad ala fissa presenti sul mercato, è stato considerato opportuno adottare un angolo di freccia di 8°, simile a velivoli di dimensioni confrontabili.

Nel seguito vengono quindi mostrati i risultati in termini di campo di pressioni relativi alla semi-ala disegnata e costruita in SolidWorks.



Figura 28: Semi-ala realizzata in SolidWorks



Figura 29: Flow trajectories sulla semi-ala



Figura 30: Cut plot - campo di pressioni su sezione di semi-ala

Come si può notare dal cut-plot della figura sopra, il profilo alare, investito da una corrente a 10 m/s con un'inclinazione di 10°, presenta ancora una zona di depressione sul dorso e una zona a più alta pressione sul ventre; ciò permette quindi di realizzare una discreta portanza. I valori trovati mediante la simulazione aerodinamica in Flow Simulation per una velocità di 10 m/s risultano:

Angolo di attacco [°]	Portanza [N]
-10	5.9
-5	8.7
0	10.8

Tabella 7: Valori di portanza al variare dell'angolo di attacco per la semi-ala

La fusoliera e le due semi-ali sono i corpi che danno il contributo di portanza maggiore all'intero APR; un'ulteriore analisi aerodinamica viene inoltre realizzata per il velivolo completo: sempre in ambiente CAD SolidWorks vengono realizzati longheroni, componenti interne, bracci dei motori, motori e carrello e in seguito assemblati per ottenere la configurazione della figura sottostante.



Figura 31: APR completo realizzato in SolidWorks

Per quanto riguarda aspetti quali la costruzione dei vari componenti, le relative dimensioni e il loro assemblaggio, essi verranno discussi ampiamente all'interno del capitolo 6 riguardante i materiali e gli alloggiamenti. In questa parte ci si limita a valutare la bontà dal punto di vista aerodinamico per avere intanto chiaro e delineato questo importante aspetto del progetto. Di seguito vengono quindi mostrati i risultati legati alle simulazioni CFD per l'APR completo, così come eseguito in precedenza per la fusoliera e le due semi-ali.



Figura 32: Surface plot - campo di pressioni sull'APR completo



Figura 33: Flow trajectories sull'APR completo

In questo caso non è stato eseguito un cut-plot dal momento che, prendendo una semplice sezione, il grafico avrebbe mostrato l'andamento delle pressioni o sulla fusoliera o sull'ala, andamenti già visti in precedenza. È stato quindi inserito un surface-plot che evidenzi come si comportano le pressioni su tutte le superfici esposte al flusso. La velocità di quest'ultimo è sempre 10 m/s con un angolo di 10° rispetto al corpo. Come si può notare dalla figura 32, anche con questi parametri è possibile riscontrare una zona di depressione sul dorso e una zona a pressione più elevata al bordo d'attacco. I dati ricavati dalla simulazione CFD a 10 m/s vengono inseriti nella seguente tabella:

Angolo di attacco [°]	Portanza [N]
-10	13.6
-5	19.8
0	26

Tabella 8: Valori di portanza al variare dell'angolo di attacco per l'APR completo

Si nota quindi come, con un corpo che presenti una buona aerodinamica e superfici alari di circa 1 m², si possano ottenere valori di portanza non indifferenti, tutto ovviamente in relazione alla velocità e all'angolo di attacco. Questi valori, tuttavia, non consentono la planata a motori spenti dell'APR. È utile quindi realizzare un nuovo

studio aerodinamico immaginando la seguente condizione: l'APR si porta, mediante la spinta dei motori, ad una velocità di 15/20 m/s, dopodiché spegne i motori riportandosi ad un angolo di attacco nullo e realizza per il massimo tempo possibile una planata.

Di seguito viene riportata una tabella contenente i dati ottenuti mediante analisi CFD a diverse velocità di volo, tenendo nullo l'angolo di attacco:

Velocità [m/s]	Portanza [N]
10	26
12	38.58
14	52.86
16	69.22
18	87.73
20	108.53

Tabella 9: Valori di portanza per l'APR completo a diverse velocità e angolo di attacco nullo



Grafico 2: Portanza al variare della velocità per l'APR completo

Dal grafico si evince chiaramente come all'aumentare della velocità di traslazione aumenti la portanza fornita dal corpo. Questo dato è di vitale importanza per il progetto: considerando un MTOW di circa 40 N, una velocità compresa tra 12 e 14 m/s potrebbe permettere all'APR di generare una portanza tale da consentire una fase di planata.
4.4 Scenari di volo

Una volta considerati i dati precedenti, si prefigurano due diversi scenari:

- 1. La portanza generata a basse velocità viene sfruttata riducendo il numero di giri dei motori, quindi la manetta comandata e la richiesta di energia alla batteria. Questo può portare quindi ad avere autonomie elevate sia in termini di minuti che di km.
- 2. L'APR in volo traslato, viene accelerato fino a raggiungere una velocità superiore ai 12/14 m/s, per poi planare a motori spenti riducendo progressivamente la quota; una volta raggiunta una velocità inferiore a quelle indicate, i motori vengono riaccesi e si procede ad una semplice discesa verticale come un normale quadricottero.

4.4.1 Primo scenario

Per quanto riguarda il primo caso è possibile realizzare un semplice calcolo che permetta di ottenere una stima dell'autonomia e del risparmio in termini di potenza richiesta ai motori.



Figura 34: Venture - Pro S3 in volo traslato a 10 m/s



Figura 35: APR oggetto di studio in volo traslato a 10 m/s

Per rendere più chiaro il confronto, i due APR verranno schematizzati e quindi saranno inserite le forze in gioco.



Figura 36: Schematizzazione delle forze - Venture



Figura 37: Schematizzazione delle forze - APR oggetto di studio

Viene definito di seguito il sistema delle forze lungo l'asse orizzontale e lungo quello verticale, eguagliando le forze nella configurazione base, il Venture, e in quella "nuova", al fine di evidenziare successivamente il risparmio in termini di potenza richiesta alla batteria:

dove $F_A \in F_B$ (così come F_A ' e F_B ') sono rispettivamente la spinta data dai motori anteriori e posteriori, $D_1 \in D_2$ sono le resistenze dei due corpi mentre F_P è la portanza data dalla seconda configurazione.

Nell'equazione riferita all'asse verticale, i contributi delle due forze peso è possibile eliminarli dal momento che si presuppone per entrambe le macchine un peso pressoché identico.

Per ottenere una misura del risparmio di potenza è utile soffermarsi in particolare sulla prima equazione.

Si considera la potenza come:

$$W = F \cdot s \cdot \frac{1}{t} = F \cdot v$$

Per le due configurazioni diventa:

$$W_1 = 2 \cdot (F_A + F_B) \cdot v - \frac{D_1}{\sin \alpha} \cdot v$$
$$W_2 = 2 \cdot (F_A' + F_B') \cdot v + Fp \cdot v - \frac{D_2}{\sin \alpha} \cdot v$$

Ora è possibile quantificare il risparmio come segue:

$$risp \% = \frac{Fp \cdot v - \frac{D_2}{\sin \alpha} \cdot v}{2 \cdot (F_A + F_B) \cdot v - \frac{D_1}{\sin \alpha} \cdot v}$$

È utile quindi a questo punto introdurre dei valori numerici, trovati mediante i file log del Venture e mediante analisi CFD in ambiente Flow Simulation di SolidWorks. I risultati restituiti dal software per quanto riguarda la nuova configurazione dell'APR manifestano una certa attinenza alla realtà. Lo stesso purtroppo non si può dire nel caso del Venture: data la sua complessa geometria non è possibile, a meno di semplificazioni, trovare un valore di resistenza plausibile. Tale dato per cui è fornito da semplici calcoli.

Di seguito vengono riassunti i dati da inserire nell'equazione precedente.

α	10°
Fp	13.6 N
D1	4.9 N
D_2	2 N
$(F_A + F_B)$	20 N

Tabella 10: Valori delle forze per le due configurazioni in volo traslato a 10 m/s

Dalla formula precedente si ricava quindi:

risparmio % =
$$\frac{13.6 - \frac{2}{\sin(10)}}{40 - \frac{4.9}{\sin(10)}} \simeq 0.17 = 17\%$$

Questo risparmio energetico indica che, a pari velocità, il numero di RPM della seconda configurazione sarà sicuramente minore, portando ad una minor richiesta di potenza alla batteria. Dai test in volo del Venture si ricava una potenza complessiva di circa 300 W assorbita dai 4 motori in volo traslato a 10 m/s; in questo caso la potenza richiesta si attesterà quindi intorno ai 250 W, facendo in modo che possa

aumentare l'autonomia sia in termini di tempo di volo che in termini di distanza percorribile.

Questo risparmio va a vantaggio dell'autonomia complessiva del mezzo: se per il Venture ci si attestava intorno ai 50 minuti, con l'efficienza riscontrata in questa seconda configurazione si arriva ad una autonomia complessiva intorno ai 60 minuti.

4.4.2 Secondo scenario

Vengono eseguite delle prove anche per quanto riguarda il secondo scenario, ovvero la possibilità di planare. Di seguito si riassumono i dati ricavati per portanza e resistenza a diverse velocità di volo.

Velocità [m/s]	Portanza [N]	Resistenza [N]
10	26	3.88
12	38.58	5.56
14	52.86	7.56
16	69.22	9.88
18	87.73	12.48
20	108.53	15.42

Tabella 11: Portanza e resistenza a diverse velocità con angolo di attacco nullo

Volendo graficare l'andamento della resistenza con la velocità e della portanza con la velocità si ricorre ad uno studio statistico realizzato mediante l'ausilio di Excel. In primis si considera la relazione tra resistenza e velocità:

	Velocità (x)	Resistenza (y)	x^2	xy	y^2
	10	3.88	100	38.8	15.0544
	12	5.56	144	66.72	30.9136
	14	7.56	196	105.84	57.1536
	16	9.88	256	158.08	97.6144
	18	12.48	324	224.64	155.7504
	20	15.42	400	308.4	237.7764
Somma	90	54.78	1420	902.48	594.2628

Si calcolano quindi la covarianza (x,y) e le due varianze v(x) e v(y).

cov(x,y)	13.46333
v(x)	11.66667
v(y)	15.6869

Mediante questi dati è possibile calcolare il coefficiente di regressione, il termine noto e il coefficiente di correlazione lineare.

	$b = \frac{cov(x, y)}{v(x)}$
	$a = E(y) - E(x) \cdot b$
	$\rho = \frac{cov(x,y)}{\sqrt{v(x) - v(y)}}$
54	

b	1.154
a	-8.18
ρ	0.99520062

Si evince quindi una quasi perfetta linearità tra resistenza e velocità.

Lo stesso tipo di calcolo viene effettuato ponendo in relazione portanza e velocità.

	Velocità (x)	Portanza (z)	x^2	\mathbf{XZ}	z^2
	10	26	100	260	676
	12	38.58	144	462.96	1488.4164
	14	52.86	196	740.04	2794.1796
	16	69.22	256	1107.52	4791.4084
	18	87.73	324	1579.14	7696.5529
	20	108.53	400	2170.6	11778.761
Somma	90	382.92	1420	6320.26	29225.318

Tabella 13: Studio statistico velocità - portanza

cov(x,y)	96.07667
v(x)	11.6667
v(y)	797.894

In questo caso, per non confondere la trattazione seguente, il coefficiente di regressione e il termine noto vengono indicati rispettivamente con d e c.

d	8.23514286
с	-59.7071429
ρ	0.99579959

Come nel caso precedente, si ottiene una quasi perfetta linearità tra i parametri presi in considerazione.

Supponendo che l'APR sia a motori spenti, è possibile, mediante il diagramma di corpo libero, andare a ricavare importanti informazioni circa il moto dell'APR.



Figura 38: Diagramma di corpo libero ad angolo di attacco nullo

Le forze negli assi verticale e orizzontale risultano:

$$\begin{cases} ma_{y} = mg - F_{P} \\ ma_{x} = D \end{cases}$$

Queste due equazioni vengono scritte nuovamente, evidenziando le due accelerazioni come la derivata nel tempo della velocità e sostituendo a Fp e a D i termini corrispondenti in funzione del coefficiente di regressione e del termine noto.

$$\begin{cases} \dot{V_y} = -\frac{d}{m}V_x + \left(g - \frac{c}{m}\right) \\ \dot{V_x} = \frac{b}{m}V_x + \frac{a}{m} \end{cases}$$

È utile in questo caso soffermarsi sulla seconda equazione e risolvere quindi l'integrale a variabili separabili.

$$\int_{V0}^{Vf} \frac{dV_x}{\frac{b}{m}V_x + \frac{a}{m}} = \int_{t0}^{tf} dt$$

Introducendo il cambio di variabili $\frac{b}{m}V_x + \frac{a}{m} = u$ $du = \frac{b}{m}dV_x$ $dV_x = \frac{m}{b}du$ si ottiene quindi:

$$\frac{m}{b} \left[\ln \left(\frac{b}{m} V_x + \frac{a}{m} \right) \right]_{V0}^{Vf} = -t$$
$$\frac{m}{b} \left[\ln \frac{\left(\frac{b}{m} V_f + \frac{a}{m} \right)}{\left(\frac{b}{m} V_0 + \frac{a}{m} \right)} \right]_{V0}^{Vf} = -t$$

Mediante questa equazione, ipotizzando una velocità V_0 a cui i motori vengono spenti, è possibile ricavare, al diminuire della velocità V_f , quale sia il tempo di planata e approssimando su ogni tratto $\Delta x = V \cdot \Delta t$, anche la distanza percorsa in planata. Questa funzione, come le precedenti, è stata impostata in Excel a partire da una velocità V_0 pari a 16 m/s.

$V_{\rm f} [{ m m/s}]$	t [sec]	$\Delta x [m]$
16	0	0
15	0.41256	1.00118
14	0.88094	1.001521
13	1.42266	1.002035
12	2.065	1.00286
11	2.85409	1.004315
10	3.87746	1.007253

	Somma	6.019165	
Tabella 14: Tempi di	i volo e spazio	o percorso in p	lanata

Da questi semplici calcoli risulta evidente come la planata non sia possibile se non per pochi secondi e pochissimi metri. Allo stesso tempo, portare l'APR a velocità superiore per estendere questo tempo, porterebbe inevitabilmente ad un maggior consumo e ad un maggiore stress per il motore stesso.

Tale APR pertanto risulta costruito per andare ad ottimizzare il volo traslato, producendo un risparmio energetico non indifferente, ma non è adatto al volo planato, destinato ad APR con allungamenti alari maggiori e in grado di raggiungere elevate velocità di traslazione.

Capitolo 5

La scelta dei componenti

All'interno di questo capitolo viene affrontato uno degli aspetti principali dell'APR: la scelta dei componenti. La prima parte del capitolo affronterà l'aspetto propulsivo: esso rappresenta il punto focale soprattutto in termini di autonomia, poiché i motori sono, tra tutti i componenti all'interno dell'APR, quelli che richiedono maggiore energia e quindi inficiano in maniera importante sulla batteria.

Oltre a chiarire la panoramica dei motori, siano essi a spazzole o brushless, verrà eseguito uno studio per arrivare ad adottare a bordo della macchina i motori più performanti possibile, sia in termini di spinta ma soprattutto in termini di efficienza, aspetto cruciale di tutto il progetto.

La seconda parte si occuperà invece della scelta dei componenti interni, come ad esempio batteria ed autopilota, descrivendo le principali funzioni e mostrando l'interfaccia tra di essi.

5.1 La propulsione

5.1.1 Motori a spazzole e motori brushless

Tra i motori in corrente continua, i primi ad essere studiati e progettati furono quelli a spazzole; essi di fatto rappresentarono la prima risposta tecnologica alla necessità di creare una coppia meccanica partendo da una corrente continua [20].



Figura 39: Motore a spazzole [20]

Tale tipo di motore presenta uno statore, costituito dalla parte esterna fissa, e da un rotore, parte interna mobile. Il generatore fornisce corrente ai componenti spazzole e commutatore, le forze di Lorentz generano una coppia che, raccolta dal supporto, permette al rotore di muoversi portando il collettore in rotazione. L'abbinamento spazzole e collettore risulta l'unica soluzione che permette:

- alla corrente di entrare nei conduttori del rotore, mediante contatti striscianti;
- di invertire il verso di percorrenza della corrente ad ogni semi-giro, grazie alla rotazione del commutatore; questo permette la concordanza di coppia e il movimento del rotore sempre nello stesso verso.

Qualora si voglia aumentare la coppia del motore, sarà necessario:

- 1. disporre di un campo magnetico B più elevato;
- aumentare il numero di tratti rettilinei del conduttore, avvolgendo quindi più spire di filo;
- 3. adottare rotori con più coppie polari.

Queste ultime due soluzioni vanno però a complicare eccessivamente il progetto del collettore.

La tecnologia dei motori a spazzole è stata nel tempo rivista e superata poiché, oltre alla complessità, sono sorti nel tempo vari inconvenienti quali:

- elevato pericolo di incendio o esplosioni, innescate dalle scintille tra spazzole e collettore, spesso in presenza di polveri o agenti corrosivi;
- eccessiva manutenzione, soprattutto per quanto riguarda spazzole o lamelle del commutatore usurate;

- limiti di velocità di rotazione, che influisce negativamente sul contatto spazzole/commutatore;
- limiti di tensione e corrente;
- disturbi elettrici;
- notevoli problemi nello smaltimento del calore in seguito alla rotazione del rotore sullo statore;
- costo e peso elevati.

Tutte queste limitazioni hanno portato a rivedere tale tipo di motore e iniziare a considerare alcune alternative; la migliore tra queste si è rivelata essere il motore privo di spazzole, "brushless". Questo tipo di motore consente elevate prestazioni nel controllo e nel movimento e rappresenta ad oggi la soluzione più usata nei moderni azionamenti; nelle applicazioni aerospaziali la quasi totalità degli azionamenti elettrici di posizione è realizzata, modernamente, con motori brushless.

Dal punto di vista costruttivo la sostanziale differenza fra il motore in corrente continua a magneti permanenti ed il motore brushless risiede nel fatto che in quest'ultimo i magneti sono posti sul rotore (circuito induttore), mentre gli avvolgimenti elettrici con le relative fasi sono posti sullo statore (circuito indotto); questa proprietà permette di non adottare dei contatti striscianti per alimentare gli avvolgimenti.



Figura 40: Motore brushless [21]

Se si immagina di alimentare le tre fasi di statore con tre correnti alternate di frequenza f, opportunamente sfasate, si avrà in ogni avvolgimento un campo magnetico alternato. La risultante dei tre campi sarà un campo magnetico rotante e costante in modulo. Per effetto della coppia che si crea dall'interazione dei due campi magnetici il rotore tenderà a ruotare con una certa velocità angolare al fine di raggiungere l'allineamento tra i due campi.

Per mantenere lo sfasamento mentre la macchina ruota, occorrerà commutare la corrente negli avvolgimenti di statore, in modo dipendente dalla posizione del rotore: quindi a monte ci dovrà essere un commutatore statico (inverter), comandato da un segnale che deve rilevare la posizione rotorica. Esso sarà quindi in grado di determinare istante per istante quali fasi attivare per fornire la coppia desiderata durante la rotazione.

Tra i vantaggi dei motori brushless possiamo sicuramente annoverare:

- 1. funzionamento fluido;
- 2. efficienza e affidabilità, che definiscono un basso livello di manutenzione;
- 3. controllo accurato di velocità e posizione;
- 4. silenziosità durante l'utilizzo.

Anche questo tipo di motore manifesta però degli aspetti negativi, in particolare delle perdite, quali perdite per eccitazione, legate alle condizioni di carico, perdite meccaniche per attrito e ventilazione, comunque molto piccole, perdite nel ferro dovute a isteresi e correnti parassite, e perdite nel rame statorico, legate all'effetto Joule nell'avvolgimento statorico.

Nella figura sottostante viene mostrato il confronto tra i due motori di cui si è discusso:



Figura 41: Caratteristiche di funzionamento motore a spazzole e motore brushless [20]

Si nota in particolare la capacità del motore brushless di operare a velocità più alte con un limite di coppia praticamente costante, ma una caratteristica di funzionamento sostanzialmente simile a quella di un motore DC a spazzole; entrambi i motori hanno dei limiti imposti in particolare per quanto riguarda la massima velocità che porterebbe ad un riscaldamento eccessivo per un funzionamento continuo.

5.1.2 Parametri caratteristici dei motori brushless

Tra i principali parametri che caratterizzano maggiormente un motore brushless, quello che riveste il ruolo più importante è sicuramente il KV, definito come il rapporto tra le RPM, rotazioni al minuto, e i Volt, V, applicati al motore senza carico [21]. In formula:

$$KV = \frac{RPM}{V_{senzacarico}}$$

Questo parametro in sostanza implica che, aumentando la tensione applicata al motore, aumenterà di conseguenza la sua velocità di rotazione, fino a raggiungere quindi il limite definito dal KV.

Per capire meglio questo numero, risulta importante un esempio: supponendo di avere un motore da 360 KV alimentato da una batteria a polimeri di litio (LIPO) a 4 celle in serie (4S), quindi con una tensione di 14.8 V, il calcolo risulterebbe il seguente:

$14.8 \cdot 360 = 5328 RPM$

Nel caso in cui lo stesso motore venisse alimentato con una tensione maggiore, per esempio a 22.2 V, identificativi di una batteria 6S, esso sarebbe in grado di girare più velocemente fino a raggiungere:

$22.2 \cdot 360 = 7992 RPM$

È ovvio che non è possibile alimentare ciascun motore con una tensione a piacimento: per ogni motore, all'interno dei datasheet del costruttore, si trovano specifici valori di tensione. Nel caso si utilizzino come alimentazione batterie dalla tensione diversa da quella specificata, potrebbero risultare due casi:

1. tensione troppo bassa: il motore non sarebbe in grado di generare una coppia sufficiente;

2. tensione troppo alta: il motore tenderebbe a girare troppo velocemente e questo potrebbe portarlo a fondersi.

Risulta quindi fondamentale, durante la scelta del motore, andare a considerare anche la batteria che sarà adottata.

È evidente a questo punto che i motori caratterizzati da un valore di KV elevato, siano quelli che girano più velocemente e siano in grado di generare una coppia inferiore. Di conseguenza tale tipo di motore sarà associato ad un'elica piccola, che induce una coppia resistente molto bassa. Vale esattamente il contrario per quanto riguarda i motori con KV basso, quelli che saranno presi maggiormente in considerazione durante questo studio.

Il motore, oltre a influenzare la scelta della batteria (e viceversa), influenza anche la scelta delle eliche: motori con KV bassi dovranno montare eliche grandi, che permettano di realizzare voli più lenti e dolci, mentre motori con KV elevati monteranno eliche piccole, adatte a modelli piccoli, agili e che necessitano di eseguire manovre repentine, per esempio i droni destinati alle gare in fpv (acronimo di "first person view"). L'aspetto delle eliche sarà comunque affrontato meglio nella sezione dedicata.

Altro parametro importante nella scelta di un motore è sicuramente il numero di Ampere (A) massimo che il motore può richiedere quando dovrà raggiungere il suo limite massimo. Sempre all'interno dei datasheet forniti dai costruttori, è possibile trovare questo dato, associato a diversi valori di manetta. È importante quindi dimensionare a dovere anche i regolatori, ESC, posti a monte del motore, affinché non arrivino a fondersi.

5.2 Scelta del motore

Tra i produttori di motori, spiccano tra tutti per affidabilità e reperibilità:

- 1. T-Motor [22];
- 2. Dys [23];
- 3. Mad [24];
- 4. Dualsky [25].

Come detto in precedenza, ogni produttore mette a disposizione un datasheet contenente i parametri principali del motore; è possibile vederne due esempi nella figura seguente:

Item No.	Voltage (V)	Prop	Throttle	Current (A)	Power (W)	Thrust (G)	RPM	Efficiency (G/W)	Operating Temperature (°C)
		T-MOTOR 14*4.8CF	50%	1.3	19.24	350	2700	18.19	43
			65%	2.9	42.92	560	3500	13.05	
			75%	4	59.2	700	4000	11.82	
			85%	5.2	76.96	840	4500	10.91	
			100%	6.3	93.24	940	4700	10.08	
	14.8	T-MOTOR 15*5CF	50%	1.6	23.68	430	2600	18.16	45
			65%	3.4	50.32	670	3400	13.31	
MN3508 KV380			75%	5	74	820	3800	11.08	
			85%	6.4	94.72	1000	4200	10.56	
			100%	7.5	111	1100	4500	9.91	
			50%	2	29.6	440	2500	14.86	46
		T-MOTOR 16*5.4CF	65%	3.9	57.72	700	3300	12.13	
			75%	5.9	87.32	900	4000	10.31	
			85%	7.6	112.48	1100	4500	9.78	
			100%	9	133.2	1220	4800	9.16	

		LOAD TYPE					
Item No.	KV	VOLTAGE	CURRENT	Pull	Power	EEP	
	rpm/v	v	A	g	w	%	Battery/prop
		22.2	2.4	600	53.28	11.26	
			3	700	66.6	10.51	
			3.5	800	77.7	10.30	
	350		4	900	88.8	10.14	LIPox5/15X5.5
			4.9	1000	108.78	9.19	
			5.7	1100	126.54	8.69	
			14.5	2100	321.9	6.52	
5E4114-10(350KV)		18.5	2.9	600	53.65	11.18	
			3.6	700	66.6	10.51	
			4.3	800	79.55	10.06	
			5.1	900	94.35	9.54	LiPox6/15X5.5
			5.8	1000	107.3	9.32	
			6.5	1100	120.25	9.15	
			11.5	1670	212.75	7.85	1

Figura 42: Esempi di datasheet messi a disposizione dai produttori [22][23]

Oltre ad indicare il voltaggio con cui è stato testato, utile per trarre importanti conclusioni per quanto riguarda le batterie, viene inserita una colonna apposita, la terza, contenente i dati riguardanti il tipo di elica con cui quel motore è stato testato. Per ognuna, vengono indicate 5 diverse percentuali di manetta (*Throttle*) e i rispettivi valori di Corrente (A), Potenza (W), Spinta (G), RPM ed Efficienza (g/W). Viene inoltra segnata la temperativa operativa di ciascuna elica con il motore.

I valori della percentuale di manetta in genere sono diversi per ogni costruttore, sotto questo punto di vista non si è ancora raggiunta una certa uniformità; ad ogni modo le percentuali sono quasi sempre maggiori del 50% e il motivo è ben chiaro: il regime di funzionamento ottimale per un APR si verifica con una manetta intorno al 50-55-60-65%, questo per permettergli nel caso di raffiche o manovre repentine, di poter sfruttare ancora una buona quantità di manetta e performare il volo nelle migliori condizioni. Proprio per questo motivo, lo studio per trovare il migliore motore da poi adottare a bordo della macchina, sarà eseguito prendendo a riferimento i dati relativi

al 50% della manetta per ogni motore e per ogni costruttore: diversamente sarebbe impossibile eseguire un confronto attendibile.

Per andare a identificare il motore che possa risultare adeguato al progetto, risulta fondamentale partire dal peso ipotetico che l'APR avrà a progetto ultimato: circa 3.5/4 kg. Questo peso è necessario che si ripartisca sui 4 motori per cui:

$4000/4 = 1000 \ g$

Ogni motore dovrà essere quindi in grado di portare circa 1000 g, ricordando sempre che questa spinta si rende necessaria ad una percentuale tra il 50 e il 65% della manetta massima. Il confronto sarà comunque realizzato, come detto, al 50% anche per semplicità e questo "autorizza" pertanto a considerare anche una spinta leggermente inferiore ma comunque possibilmente vicina agli 800 g.

La tensione di alimentazione adeguata per motori di questo tipo viene identificata a 22.2 V, per cui le batterie che si andranno a considerare nel seguito saranno quelle composte da 6 celle in serie (6S).

Per operare un confronto il più possibile intellegibile e chiaro, risulta utile non considerare tutti i parametri forniti dai datasheet ma attenersi ai 3 principali:

- 1. Peso del singolo motore;
- 2. Spinta al 50% di manetta;
- 3. Efficienza, misurata come il rapporto tra grammi di spinta e potenza in Watt [g/W].

Durante questo studio, sono stati analizzati 29 motori, le cui caratteristiche sono riassunte in un file Excel; di seguito viene riportato un grafico contenente i parametri sopra citati per i motori di diversi costruttori ritenuti più idonei allo scopo e che quindi rispondono alle caratteristiche evidenziate in precedenza; per completezza verrà riportata anche precisa indicazione circa l'elica utilizzata per condurre i test.

Motore	KV	Peso [g]	Spinta al 50% [g]	Efficienza	Elica
			430	11.39	T-MOTOR 12*4CF
T-MOTOR MN3508	200	103	550	11.8	T-MOTOR 13*4,4CF
	000		710	11.03	T-MOTOR 14*4,8CF
			820	10.26	T-MOTOR 15*5CF
			350	9.85	T-MOTOR 12*4CF
T-MOTOR	360	117	460	11.51	T-MOTOR 13*4,4CF
MN3510	500	111	660	11.89	T-MOTOR 14*4,8CF
			780	11.71	T-MOTOR 15*5CF
DYS BE4114	350	150	600	11.18	$15^{*}5.5$
			600	10	14*4.8
$\mathrm{MAD}\ 5010$	240	155	820	9.8	15*5
			960	10	16*5.4
DUALSKY XM5015HD	340	165	858	10.5	16

Tabella 15: Caratteristiche motori - prima scrematura

Come risulta evidente dal grafico sopra, la scelta dell'elica influenza molto la spinta che il motore riesce a fornire: è chiaro che essa dovrà avere dimensioni nell'ordine di 15-16". L'ulteriore "scrematura" viene proprio realizzata in base alla spinta, requisito indispensabile e affatto negoziabile. Vengono quindi riassunti i motori con le eliche che garantiscano un livello di spinta accettabile:

Motore	KV	Peso [g]	Spinta al 50% [g]	Efficienza	Elica
T-MOTOR MN3508	380	103	820	10.26	T-MOTOR 15*5CF
T-MOTOR MN3510	360	117	780	11.71	T-MOTOR 15*5CF
MAD 5010	240	155	820	9.8	15*5
	- 10	100	960	10	$16^{*}5.4$
DUALSKY XM5015HD	340	165	858	10.5	16

Tabella 16: Caratteristiche motori - seconda scrematura

I dati relativi a questa tabella vengono riassunti nei grafici sottostanti, per cercare di rendere di più facile interpretazione lo studio.



Grafico 3: Spinta al 50% di manetta dei 5 motori considerati



Grafico 4: Efficienza al 50% di manetta dei 5 motori considerati



Grafico 5: Pesi dei 5 motori considerati

Guardando inizialmente i grafici riferiti alla spinta e all'efficienza, è possibile scartare inizialmente il terzo motore, il MAD 5010 KV240: durante i test, monta la stessa elica del T-MOTOR MN3508 KV380, mostrando difatti una spinta identica, ma un'efficienza inferiore. Per questione di ingombri viene scartato lo stesso motore, questa volta con elica da 16''; purtroppo le dimensioni penalizzano in modo eccessivo la scelta dal momento che le dimensioni dell'APR non dovranno essere esageratamente grandi.

Tra il primo e l'ultimo motore il confronto risulta particolarmente articolato: essi hanno un'efficienza paragonabile, ma il DUALSKY XM5015HD KV340 presenta, a fronte di una spinta superiore, un aumento di peso molto importante. Se per la spinta si riscontra un aumento di circa il 5%, quei 52 g di peso in più indicano un aumento in peso del 60%. Considerando i 4 motori che andranno montati a bordo dell'APR, potrebbero contribuire ad un aumento di peso poco più di 200 g. Per questo motivo la scelta non può che ricadere su uno dei primi due motori.

I T-MOTOR MN3508 KV380 e MN3510 KV360 hanno un peso abbastanza simile, mentre la spinta è a vantaggio del primo. Il "cavallo di battaglia" del secondo è però l'efficienza, superiore del 14%. È questa la chiave che porta a scegliere il secondo motore, il T-MOTOR MN3510 KV360.

I 4 motori al 50% di manetta sono in grado di generare

 $780 \cdot 4 = 3120 \ g$

a fronte dei 3500/4000 circa necessari, considerando un peso complessivo di 3.5/4 Kg per l'appunto. Sarà quindi necessario prevedere che in hovering la percentuale di manetta motore sia leggermente più alta, intorno al 60/65%; tutto ciò verrà comunque chiarito una volta che si conoscerà il peso esatto della macchina.



Figura 43: T-Motor MN3510 KV360 [22]

Di seguito vengono mostrate le caratteristiche dimensionali principali del motore scelto.

Dimensioni [mm]	φ41.8*28.5
Peso [g]	117
T 1 11 17 D:	1.1

Tabella 17: Dimensioni e peso del motore

5.3 Elica

Immediatamente a valle della scelta del motore, vi è quella dell'elica, cioè dell'organo effettivamente deputato alla generazione di spinta dell'APR. Essa è costituita da un mozzo, parte centrale che permette l'inserimento all'interno dell'albero motore, e dalle pale, con particolari caratteristiche [26].



Figura 44: Esempio elica bipala [26]

I parametri che caratterizzano un'elica sono due:

- 1. diametro: distanza massima (punta-punta) delle due pale espressa in pollici, la cui rotazione genera un disco, area di lavoro dell'elica;
- 2. passo (pitch): distanza che in condizioni ideali l'elica percorrerebbe durante una intera rotazione, espresso anch'esso in pollici.

Quest'ultimo parametro è di notevole importanza sia per la portanza che conferisce all'elica sia per il fatto che, nel caso il suo valore sia eccessivo, la corrente assorbita dal motore potrebbe aumentare, provocando la fusione tra gli avvolgimenti.

La forma dell'elica riveste un ruolo piuttosto rilevante per quanto riguarda le performance generali del modello; di particolare importanza risulta essere il tip, zona della pala in cui il flusso si trova ad essere maggiormente turbolento.

Per quanto riguarda i materiali, le eliche possono essere realizzate in fibra di carbonio, plastica, fibra di vetro, legno, ecc.

Al fine di comprendere le prestazioni di un rotore, in termini di spinta e potenza, è utile richiamare la teoria del disco attuatore e quella dell'elemento di pala [27].

5.3.1 Teoria del disco attuatore (TDA)

Si tratta di una teoria di origine meccanica per studiare lo scambio di quantità di moto attraverso un'elica.



Figura 45: Teoria del disco attuatore

Secondo tale teoria, il rotore viene ridotto ad un disco che, ceduta energia all'aria, ne riceve per reazione una forza. Di seguito vengono elencate le ipotesi fondamentali della Teoria:

- 1. identificazione tubo di flusso convergente, separato dal flusso esterno;
- 2. rotore con numero di pale infinito;
- 3. disco a spessore nullo e permeabile al flusso;
- 4. sul disco agisce una differenza di pressione costante;
- 5. il fluido è perfetto e incomprimibile;
- 6. tutte le velocità sono assiali;
- 7. nessun tipo di perdita.

La spinta (thrust, T) data dal rotore è proporzionale alla differenza di pressione attraverso il disco

$$T = A(p_2 - p_1)$$

Richiamando la variazione di quantità di moto è possibile scrivere la stessa espressione come

$$T = \dot{m}(V_{+\infty} - V_{-\infty})$$

Dove \dot{m} è la portata in massa, che può essere scritta $\dot{m} = \rho A v_1 = \rho A v_2$.

Secondo le assunzioni fatte in precedenza, è possibile scrivere l'equazione di Bernoulli tra le sezioni $+\infty$ e 1 e tra le sezioni 2 e $-\infty$, ma non a cavallo del disco.

$$p_{-\infty} + \frac{1}{2}\rho V_{-\infty}^2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2$$
$$p_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 = p_{+\infty} + \frac{1}{2}\rho V_{+\infty}^2$$

Ciò consente di scrivere

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2} \rho (V_{+\infty}^2 - V_{-\infty}^2)$$

Combinando le espressioni precedenti si ottiene

$$v_1 = v_2 = \frac{V_{+\infty} + V_{-\infty}}{2}$$

Introducendo il concetto di velocità indotta v_i e indicando con v la velocità della corrente in un generico punto del tubo di flusso

$$v_i = v - V_{-\infty}$$

E in corrispondenza del disco rotore

$$u = v_1 - V_{-\infty} = \frac{V_{+\infty} - V_{-\infty}}{2}$$

È possibile a questo punto scrivere l'espressione della trazione come

$$T = 2\dot{m}u$$

Inoltre la potenza W per il tubo di flusso può essere scritta come

$$W = \frac{1}{2}\dot{m}V_{+\infty}^2 - \frac{1}{2}\dot{m}V_{-\infty}^2 = Tv_1$$

Al disco rotore invece

W = Tu

5.3.2 Teoria dell'elemento di pala

La teoria del disco attuatore, nonostante sia uno strumento utile per avere indicazioni sulle prestazioni del rotore, non fornisce informazioni sufficientemente dettagliate e risulta limitata. Per superare questi difetti, la teoria dell'elemento di pala discretizza la pala in un numero N di segmenti, permettendo il calcolo della resistenza di profilo, della potenza necessaria e della distribuzione della velocità lungo la pala.



Figura 46: Teoria dell'elemento di pala

In primis occorre scrivere le espressioni delle forze aerodinamiche

$$dP = \frac{1}{2}\rho V_r^2 c(r) C_p(r) dr$$

$$dR = \frac{1}{2}\rho V_r^2 c(r) C_r(r) dr$$

Le forze dT, dD, la coppia dC e la potenza dW sono scritte in funzione delle forze aerodinamiche

$$dT = dPcos\phi - dRsin\phi$$
$$dD = dPsin\phi + dRcos\phi$$
$$dC = rdD = r(dPsin\phi + dRcos\phi)$$
$$dW = \Omega dC = \Omega r dD = \Omega r(dPsin\phi + dRcos\phi)$$

Ipotizzando che il rapporto di avanzamento $\phi = \arctan\left(\frac{v}{\Omega R}\right)$ sia piccolo, circa nullo, si può scrivere

> dT = dP $dD = dP\phi + dR$ $dC = r(dP\phi + dR)$ $dW = \Omega r (dP\phi + dR)$

Se con N viene indicato il numero di pale del rotore e con R la lunghezza dell'intera pala, è possibile scrivere

$$T = N \int_{0}^{R} dP$$
$$C = N \int_{0}^{R} r dD$$
$$W = \Omega C$$

5.3.3Scelta dell'elica

Nel caso oggetto di studio, essendo il motore a regimi di rotazione bassi, l'elica avrà dimensioni nell'ordine dei 15" e sarà costituita da due pale.

La scelta in questo caso richiede di considerare due diverse soluzioni: elica classica o elica foldable, la cui differenza è ben visibile nelle figure sottostanti. Per semplicità ed esperienze pregresse a livello aziendale si decide di limitare la scelta alle eliche prodotte da T-Motor, già testate con i motori scelti in precedenza [28].



Figura 47: Elica classica ed elica "foldable" T-motor [28]

	P15x5 Prop	$FA15.2 \times 5$ Prop
$\operatorname{Diametro}/\operatorname{passo}$	$15^{**}5$ (381*127mm)	$15.2^{**}5$ (386.1*127mm)
Peso	$26.5 \mathrm{~g}$	$27.5 \mathrm{~g}$
Materiale	CF+Epoxy	CF+Epoxy
Trattamento superficiale	Lucido	Lucido
Tipo di elica	2 pale integrate	Foldable
Temperatura operativa	-40° - 65°	-40° - 65°
RPM ottimo	5200-7000 RPM	$3500\text{-}6500~\mathrm{RPM}$
Limite thrust	$6~{ m Kg}$	$6~{ m Kg}$

Tabella 18: Confronto eliche considerate

Come si evince dalla tabella, le due eliche hanno caratteristiche molto simili; cambia leggermente il numero di RPM e anche la forma al tip, che nel caso di quella foldable presenta un winglet al fine di alleviare i vortici di estremità e quindi migliorare l'efficienza.



Figura 48: Particolarità aerodinamiche tra le eliche [28]

A quest'ultimo beneficio, si aggiunge ovviamente la possibilità di richiudere l'elica una volta che l'APR si trovi a terra, aumentando anche la portabilità.

La maggior reperibilità, insieme ad un costo inferiore fanno però propendere la scelta verso l'elica T-MOTOR P15x5, di cui di seguito vengono mostrate le caratteristiche dimensionali.

Dimensioni [mm]	381*127		
Peso [g]	26.5		
Tabella 19: Dimensioni e peso dell'elica			

5.4 Regolatori (ESC)

A monte del motore troviamo un altro componente importante al suo funzionamento: il regolatore o ESC, electronic speed controller [29]. Esso non è altro che un circuito elettronico che svolge 3 compiti principali: varia la velocità di rotazione del motore elettrico, il verso di rotazione e può anche agire da freno dinamico. Nel dettaglio, l'ESC è costituito da una rete di transistor che determina la variazione del campo elettrico in modo da controllare la rotazione del motore; tutto ciò viene realizzato mediante la tecnica del PWM, pulse-width modulation o in italiano "modulazione di larghezza di impulso".

Il parametro sicuramente di maggior importanza è la massima corrente sopportata; tale dato è subordinato alla tipologia di motore e alla potenza da esso assorbita. Sfruttando la terza legge di Ohm si può infatti scrivere:

$$I = \frac{P}{V}$$

Sulla base di questo dato, preso dalla tabella dei motori, si va ad operare la scelta per l'ESC adeguato, tenendo sempre un certo margine di sicurezza.

Esistono 2 diversi tipi di ESC:

1. NON OPTO: più semplici e comuni, presentano 3 cavi di collegamento al flight controller, uno negativo, uno positivo e il terzo di segnale. Possiedono inoltre un circuito BEC, battery eliminating circuit, il quale consente di alimentare ad una tensione di 5V una power distribution board dedicata.



Figura 49: ESC NON OPTO [29]

2. OPTO: possiedono solo due cavi di collegamento al flight controller, uno negativo e uno di segnale, e non possiedono un BEC integrato. Sono utilizzati per ridurre i disturbi e le interferenze, spesso generate dalla presenza di più BEC ravvicinati.



Figura 50: ESC OPTO [29]

Talvolta alla soluzione con 4 ESC, si preferisce optare per l'Herkules, una scheda che integra su di uno stesso modulo 4 o più controllori; questa soluzione oltre a garantire un minore ingombro e anche un risparmio in termini di peso, risulta la più reperibile negli appositi negozi, fisici e online.

A seguito della definizione della configurazione, così come si vedrà nel capitolo successivo, si è deciso quindi di optare per l'HERKULES III 3-6S BRUSHLESS ESC - OKTO L mostrata in figura 51. Esso è utilizzato con batterie da 3 a 6S e con una corrente di picco di 50 A, inferiori a quanto richiesti dal motore scelto in precedenza.



Figura 51: Herkules - OKTO L [29]

Dimensioni [mm]	70*70*10
Peso [g]	253

Tabella 20: Dimensioni e peso Herkules

5.5 Le componenti interne

5.5.1 Batteria

La descrizione non poteva che partire proprio dal componente fondamentale, senza il quale nessun altro potrebbe funzionare, ma anche dal più costoso, grande e pesante; risulta evidente come la sua scelta influenzi molti parametri del progetto stesso.

Nel mondo degli APR, oggigiorno, la batteria maggiormente utilizzata è quella ai polimeri di litio, conosciuta con l'acronimo "LiPo": essa costituisce la soluzione privilegiata per le aziende ma anche per i semplici aeromodellisti e rappresenta il progresso tecnologico della vecchia litio-ione. La differenza sostanziale tra le due risiede essenzialmente nella struttura interna: le moderne LiPo presentano una struttura a fogli flessibili in laminato polimerico mentre le litio-ione una struttura a nido d'ape. Volendo evidenziare pro e contro della tecnologia Li-Po:

- 1. peso inferiore e possibilità di essere costruite in molte forme e dimensioni;
- 2. rateo di scarica migliore;
- 3. capacità maggiori e quindi più potenza;
- 4. vita più corta (150/200 cicli contro i 1000 delle litio-ione);
- 5. alta possibilità di incendio se danneggiata;
- 6. particolare attenzione nelle fasi di carica, scarica e stoccaggio.

Ogni cella di una batteria LiPo ha un voltaggio nominale di 3.7 V, una tensione massima di carica di 4.2 V e una tensione minima di 3.2 V. La tensione massima e minima ne definiscono l'intervallo operativo. Nel caso la tensione scenda al di sotto di 3 V la batteria potrebbe riportare danni perenni, ragion per cui vengono attivate procedure di emergenza come segnali acustici e/o messaggi sul radiocomando dell'operatore.

Le singole celle vengono collegate in serie o in parallelo, aumentando rispettivamente il voltaggio complessivo o la capacità.

La scelta per questo progetto ricade sulla batteria Tattu mostrata nella figura seguente [30] [31].



Figura 52: Batteria Tattu 10000 mAh [31]

Essa ha una capacità di 10000 mAh, utili a raggiungere una buona autonomia in base ai test di volo realizzati con APR aziendali. L'unità di misura è il milliampere orario (mAh) che indica l'amperaggio massimo che l'utenza può assorbire dalla batteria in un'ora per scaricarla. Con la capacità aumenta però purtroppo il peso della stessa.

Il primo e il secondo parametro indicati sull'etichetta della batteria danno la misura del Voltaggio. Considerando un Voltaggio nominale di 3.7 V per ogni cella, il valore di 22.2 V indica la presenza di 6 celle in serie, indicate con la sigla 6S. Essendoci solo una cella in parallelo, nelle istruzioni della batteria, sarà indicata anche la sigla 1P.

A lato della capacità, si trova l'ultimo parametro importante della batteria da descrivere: il Discharge Rate. Tale valore, pari a 25C, indica il rateo con cui è possibile scaricare la batteria senza danneggiarla. Prendendo d'esempio proprio la batteria scelta e moltiplicando la capacità (in Ah) e il Discharge Rate, si ottiene:

$10 \cdot 25 = 250 A$

carico massimo in Ampere (A) sostenibile dalla batteria. Questo è ovviamente legato alle varie utenze ad essa collegate.

Esiste inoltre un altro rateo di scarica meno importante di quello appena descritto, definito Burst Rate, il quale indica il sovraccarico ammissibile della batteria, scaricandola completamente in appena 10 secondi.

Vengono elencate di seguito le caratteristiche dimensionali della batteria.

Dimensioni [mm]	165*65.12*62.18
Peso [g]	1368

Tabella 21: Dimensioni e peso della batteria

5.5.2 Autopilota

L'autopilota costituisce il cervello dell'APR. Oltre ad essere alimentato dalla batteria per mezzo di un Power Module, esso è responsabile dell'elettronica di bordo e quindi di tutte le componenti che saranno descritte nel seguito.

Si tratta di un sistema elettronico molto complesso in grado di controllare il volo dell'APR, sia esso manuale, "alleggerendo" il carico di lavoro al pilota, o automatico, mantenendo ad esempio la rotta preimpostata. L'autopilota scelto per il progetto è il PixHawk PX4, anch'esso collaudato a bordo di altre macchine in azienda, un autopilota open-source derivante dal progetto "Linux Foundation Drone Code" [32].



1 Spektrum DSM receiver

- 2 Telemetry (radio telemetry)
- Telemetry (on-screen display)
- USB
- 5 SPI (serial peripheral interface) bus
- 6 Power module
- 7 Safety switch button
- 8 Buzzer
- 9 Serial
- 10 GPS module
- 11 CAN (controller area network) bus
- 12 I²C splitter or compass module
- 13 Analog to digital converter 6.6 V
 14 Analog to digital converter 3.3 V
 - 5 LED indicator

Figura 53: PixHawk PX4 [32]

Come risulta evidente dalla figura 53, esso è composto da una Carrier Board la quale presenta tutte le prese per i rispettivi connettori dei moduli.

Ricevuta l'alimentazione al Voltaggio adeguato, da parte di batteria e power module, è in grado di elaborare i dati ricevuti dai sensori e dalla stazione di terra, inviando a sua volta le informazioni all'ESC in modo da ottenere la giusta risposta dai motori. La configurazione dell'autopilota avviene collegandolo al PC e programmandolo mediante software come ad esempio "Mission Planner" o "Arducopter 3.3.X" [33]. É poggibila configurare l'autopilota in 2 diugno modelità principali:

É possibile configurare l'autopilota in 3 diverse modalità principali:

- 1. Modalità Stabilized: il pilota tramite gli stick del radiocomando controlla il beccheggio e il rollio dell'APR mentre le altre grandezze vengono gestite dall'autopilota.
- Modalità Loiter: il pilota tramite gli stick controlla la quota e la posizione dell'APR. Le manovre necessarie al raggiungimento della quota e/o della posizione comandata sono gestite dall'autopilota.

3. Modalità Automatica: è tutto gestito dall'autopilota che acquisisce i comandi dal piano di volo compilato dalla stazione di terra.

Ogni componente che viene collegato al PixHawk mediante la porta stabilita, deve essere opportunamente calibrato, sia esso compass, radio o power module.

Vengono elencate di seguito le caratteristiche dimensionali dell'autopilota scelto [34].

Dimensioni [mm]	81.5*50*15.5
Peso [g]	38

Tabella 22: Dimensioni e peso PixHawk

Direttamente collegati ad esso ma sempre più spesso integrati, si possono trovare giroscopio e accelerometro, sensori inerziali utili a misurare forze di rotazione e di accelerazione.

All'interno del PixHawk è installato un RTOS, Real-Time Operating System, in grado di processare gli input provenienti dai vari sensori ed elaborare la risposta da trasmettere ai motori mediante l'ESC. La dicitura "Real-Time" sta proprio ad indicare la rapidità con cui le informazioni vengono processate ed elaborate; senza questa immediatezza, l'efficacia di un APR verrebbe sicuramente a mancare, determinandone quindi la non completa operatività.

Andare a stabilire in teoria quale sia il tempo di risposta del sistema autopilota-motore risulta particolarmente complesso, dal momento che tale calcolo andrebbe eseguito per ogni manovra, inclusa la semplice salita verticale; essendo il momento d'inerzia del disco dell'elica esiguo, nell'ordine di 0.451 g^{*}m², ci si aspetta che il delay sia molto piccolo, tale da garantire una risposta pronta e precisa al comando. Al fine di verificare tutto ciò, si è ricorsi nuovamente al file log, contenente informazioni circa un volo realizzato con l'APR Venture.

Vengono quindi analizzate 3 diverse manovre, tutte di variazione di velocità e quindi di angolo di pitch.



Grafico 6: Fase di decelerazione



Grafico 7: Fase di accelerazione 1





ATT.Pitch (Min: -10 Max: 5 Mean: 0)

ATT.DesPitch (Min: -8 Max: 2 Mean: 0)

Le due curve mostrano l'andamento del pitch (verde) e l'andamento del pitch "desiderato", quello richiesto dal pilota tramite l'apposito stick del radiocomando. Nelle 3 situazioni evidenziate sopra, è stato rilevato il tempo intercorso tra il massimo o il minimo delle due curve, trattandosi rispettivamente di fasi di decelerazione e accelerazione, indicati dalle apposite frecce. Di seguito vengono riassunti i tempi trovati:

Manovra 1	$166 \mathrm{\ ms}$
Manovra 2	$77 \mathrm{ms}$
Manovra 3	$121 \mathrm{\ ms}$

Tabella 23: Tempo di risposta PixHawk-APR

Risulta quindi evidente come i tempi di risposta siano particolarmente contenuti, nell'ordine del decimo di secondo. Dato il gran numero di manovre che è possibile eseguire, risulta complicato tracciare un andamento preciso per tutte; oltre a ciò, ogni manovra può essere eseguita a diverse velocità/accelerazioni, determinando quindi una disomogeneità nei risultati.

5.5.3 Modulo GPS + compass

È il componente che fornisce all'autopilota e quindi all'operatore i dati riguardanti il posizionamento e la direzione. L'accuratezza e la precisione con le quali viene indicata la posizione dell'APR aumenta ovviamente con il numero di satelliti a cui è in grado di "agganciarsi". Ha la possibilità di rilevare anche l'altezza dal suolo, ma per una stima più precisa è meglio adottare un altro strumento (altimetro o barometro). La scelta in questo caso ricade su UBlox GPS + Compass Module, prodotto da 3DR, che al suo interno monta sia il modulo GPS che la bussola [35] [36].



Figura 54: 3DR GPS module + compass [36]

Le peculiarità di questo modulo sono il fatto che sia già preconfigurato per lavorare con l'autopilota PixHawk, fornendo quindi un'interfaccia immediata, e che monti una batteria ausiliaria di dimensioni minime come backup.

Di seguito vengono mostrate le sue caratteristiche dimensionali [35].

Dimensioni [mm]	38*38*8.5
Peso [g]	16.8

Tabella 24: Dimensioni e peso GPS module + compass

5.5.4 Altimetro laser

L'altimetro costituisce uno strumento indispensabile laddove si voglia andare a stabilire l'esatta quota di volo. Tale componente non è indispensabile dal momento che già il GPS può fornire dati di quota; il vantaggio risiede proprio nell'accuratezza. Questo componente sfrutta un sensore laser puntato verso il suolo per stabilire la corretta quota e restituirla in telemetria al pilota.

Per svolgere questa funzione è stato scelto il Laser Altimeter SF11/A [38].



Figura 55: Altimetro laser [38]

Dimensioni [mm]	30*56.5*50
Peso [g]	30

Tabella 25: Dimensioni e peso altimetro laser

5.5.5 Power module

Questo modulo serve per alimentare l'autopilota: la tensione proveniente dalla batteria è troppo alta per alimentare il PixHawk, ragion per cui deve essere adottato questo componente che gli fornisce la giusta tensione di alimentazione, 5 V. In circolazione se ne trovano diversi, classificati in base alla tensione e agli Ampere (A) in ingresso. Viene adottato l'AttoPilot 180A, che fornisce già la connessione specifica per il Pixhawk [39] [40].



Figura 56: Collegamento Power module [40]

Di seguito vengono mostrate le sue caratteristiche dimensionali.

Dimensioni [mm]	19*15*4
Peso [g]	10

Tabella 26: Dimensioni e peso del power module
5.5.6 Buzzer

Il buzzer è un semplice dispositivo collegato all'autopilota che fornisce importanti avvisi acustici all'operatore a terra [41]. Esso può infatti entrare in funzione in 3 casi principali:

- perdita dell'APR a seguito di un atterraggio d'emergenza e conseguente localizzazione;
- avviso di voltaggio basso in caso la batteria stia esaurendo la sua carica;
- informazioni generali sull'APR, quando per esempio vengono armati i motori, quando acquisisce o perde la connessione.

Si tratta quindi di un dispositivo molto utile che non va ad influire sulle dimensioni e sul peso complessivo della macchina.



Figura 57: Buzzer [41]

Le sue caratteristiche dimensionali vengono indicate di seguito.

Dimensioni [mm]	11.8*11.8*9
Peso [g]	6
T 1 11 27 D: · · 1	

Tabella 27: Dimensioni e peso buzzer

5.5.7 Telemetry module e Receiver

Queste due componenti sono preposte alla comunicazione, la prima con la stazione di terra e la seconda con il radiocomando. Sono costituite entrambe da un modulo a cui sono collegate una o più antenne. Il Telemetry module trasmette e riceve dati dalla ground station ed è fondamentale che i due siano sempre "linkati" mediante l'autopilota, in modo che possano comunicare.

Il Receiver si occupa di ricevere i segnali comandati provenienti dal radiocomando e quindi, mediante il PixHawk, di comunicarli alle componenti responsabili delle diverse azioni [42]. Qualora la missione sia completamente automatica e a lunga distanza, è possibile che il radiocomando sia "sganciato", e quindi non collegato.

I moduli scelti per la configurazione oggetto di studio risultano:

 3DR Radio Telemetry 433 MHz Module, ricordando che per la telemetria la frequenza europea è appunto a 433 MHz, diversa da quella americana a 915 Mhz; tale componente è venduto con il modulo dotato di presa USB da poter collegare a PC o tablet [43].



Figura 58: 3DR Radio Telemetry module [43]

Dimensioni [mm]	26.7*55.5*13.3 (antenna esclusa)
Peso [g]	20

Tabella 28: Dimensioni e peso Radio Telemetry

• Turnigy 9X 2,4 GHz 8Ch Receiver (V2), da accoppiare all'apposito radiocomando, volendo venduto abbinato; a monte del Receiver è possibile inserire un PPM Sem Receiver che traduca il segnale PWM in segnale PPM da far "leggere" all'autopilota. Nelle ultime versione questo traduttore è integrato direttamente nel Receiver [44].



Figura 59: Turnigy 9X Receiver [44]

Dimensioni [mm]	$52^{*}35^{*}15$ (antenna esclusa)
Peso [g]	39

Tabella 29: Dimensioni e peso Turnigy Receiver

5.5.8 Sensori

A bordo dell'APR è possibile installare diversi dispostivi/sensori in base allo scopo della missione. Sul mercato ne esistono di svariati tipi e adatti alle missioni più diverse [45]. Si citano per esempio:

- 1. Termocamere radiometriche e non: forniscono un'immagine termica, le prime indicando il valore di temperatura assoluta di ogni punto, acquisendo in primis temperatura ambiente, trasmittanza e tipologia di materiale, e le seconde evidenziando semplicemente le differenze di temperatura.
- 2. Multispettrali: registrano la radiazione riflessa dall'area inquadrata attraverso lo spettro elettromagnetico sfruttando quindi le bande visibile, infrarossi e termica. Utilizzano in genere da 3 a 7 bande spettrali, fornendo una risoluzione spaziale maggiore di 1 metro.
- 3. Sensori fotogrammetrici: meno sofisticati dei primi due e quindi meno costosi, permettono di acquisire immagini dell'ambiente circostante. Si tratta dei sensori più comunemente utilizzati e che trovano applicazione in molti tipi di missioni.

Quelli elencati, coprono una gran parte di tutti i sensori venduti sul mercato; ne esistono ovviamente molti altri, in grado di svolgere missioni molto più specializzate, come ad esempio il rilevamento della qualità dell'aria o dell'acqua.

Per questo progetto si è scelto di adottare una camera con gimbal stabilizzatrice a 3 assi, la Kahone 3-Axis Gimbal [46].



Figura 60: Kahone 3-axis Gimbal [46]

Le sue caratteristiche dimensionali vengono indicate di seguito.

Dimensioni [mm]	79*79*126
Peso [g]	150

Tabella 30: Dimensioni e peso Kahone 3-axis Gimbal

Una volta montate tutte le componenti, la configurazione finale dovrebbe essere simile a quella riportata nell'immagine sottostante. La disposizione interna dell'APR oggetto di studio verrà discussa all'interno del capitolo seguente.



Figura 61: Configurazione finale [47]

Capitolo 6

Geometria, materiali e prove strutturali

In questo capitolo viene descritta la realizzazione delle varie parti che compongono l'APR mediante il software CAD SolidWorks. Di ogni componente verrà mostrato il dimensionamento mediante una messa in tavola, l'aspetto finale renderizzato e anche la scelta del materiale con cui è realizzato. Per validare il modello sarà infine realizzato uno studio a livello strutturale, che giustifichi le scelte e verifichi l'effettiva integrità della struttura.

6.1 Geometria e materiali

6.1.1 Fusoliera



Figura 62: Fusoliera con coperchio renderizzata

Il corpo centrale dell'APR è stato già descritto nella sua forma all'interno del capitolo 4, riguardante l'aerodinamica. In questo caso è più adeguato descriverlo da un punto di vista strettamente legato alle dimensioni e agli alloggiamenti.



Figura 63: Messa in tavola - Fusoliera

Come risulta evidente dalla messa in tavola, essa presenta due fori per lato che accolgono i due longheroni, posti a 77 e 273 mm dal bordo d'attacco. Il corpo presenta una lunghezza di 700 mm e una larghezza di 400. Sul dorso, un coperchio permette l'accesso all'interno dove trovano alloggiamento le componenti interne; il coperchio ha dimensioni di 450 * 190 mm.

La fusoliera è interamente realizzata in EPS, Polistirene Espanso Sinterizzato [48]. Questo materiale è realizzato a partire da semplici granuli di polistirene, immersi in acqua, fatti espandere in una camera in cui viene soffiato vapore acqueo intorno ai 120 °C che ne provoca il rammollimento, successivamente fatti fondere in superficie aumentando la temperatura del vapore acqueo e pressati. Il successivo taglio porterà alla definizione del pezzo desiderato. Mediante questo processo si ottiene un prodotto molto leggero, con una percentuale di aria intorno al 95%, che quindi presenta una densità molto bassa, intorno a 20-50 kg/m³.

Il peso della fusoliera e del coperchio è di circa 300 g.

6.1.2 Semi-ala



Figura 64: Semi-ala renderizzata

La semi-ala presenta due fori di cui uno passante per permettere l'alloggiamento dei longheroni; quello anteriore, in particolare, permette il passaggio dei cavi verso i motori posti alle estremità dell'APR [49].



Figura 65: Messa in tavola - Semi-ala

La corda alare alla radice è di 438 mm, all'estremità di 350 mm mentre la semiapertura alare è di 600 mm; queste misure permettono di realizzare una superficie alare di 1.0044904 m^2 .

Nonostante sia una delle parti maggiormente sollecitate durante il volo, anch'essa è realizzata in EPS: l'integrità strutturale è ottenuta mediante i due longheroni, in particolar modo da quello anteriore passante.

Il peso per semi-ala ammonta a circa 360 g.

6.1.3 Longheroni



Figura 66: Longheroni renderizzati

Come detto in precedenza, i due longheroni sono i componenti che più di tutti assolvono alla funzione strutturale. Essi vengono incollati all'interno delle apposite sedi nella semi-ala. Le loro dimensioni vengono riportate nella messa in tavola seguente.



Figura 67: Messa in tavola - Longheroni

Oltre alla loro lunghezza, è importante soprattutto considerare il loro diametro esterno e il loro spessore, rispettivamente di 19 e 1 mm. Essi sono realizzati in fibra di carbonio e spesso e volentieri si trovano sotto formati "standard" realizzati dalle aziende del settore [50]. In particolare, quelli di maggior uso e consumo nell'azienda in cui ho realizzato questo progetto, risultano avere proprio queste caratteristiche dimensionali. Per esperienze pregresse, sono quindi assicurate la loro reperibilità e fattibilità. Le caratteristiche del materiale, inserite all'interno del software per realizzare successivamente le prove di natura strutturale, vengono riassunte nella tabella seguente [51].

Densità $[kg/m^3]$	1654
Modulo elastico $[N/m^2]$	229500000000
Modulo di taglio $[N/m^2]$	3940000000
Resistenza alla trazione $[N/m^2]$	4500000000
Snervamento $[N/m^2]$	480000000

Tabella 31: Proprietà fibra di carbonio

Il peso dei due longheroni è di circa $68~{\rm g}.$

6.1.4 Raccordo



Figura 68: Raccordo longherone renderizzato

Il raccordo è il componente che fornisce il collegamento fisico tra il longherone anteriore e il profilato di carbonio alle cui estremità sono montati i motori; su di esso è inoltre agganciato il carrello di atterraggio.



Figura 69: Messa in tavola - Raccordo

Dal momento che deve assolvere a compiti di natura strutturale non indifferente, è necessario che sia realizzato in un materiale particolarmente resistente. In questo caso di enorme aiuto risulta essere l'Additive Manufacturing, anche per la forma non simmetrica del componente. Diverse aziende sul mercato permettono di "stampare" qualsiasi oggetto in un numero considerevole di materiali. L'esperienza maturata in azienda è stata utile per arrivare alla conoscenza di molte realtà operanti in questo settore; tra queste, la più congrua agli scopi si è rivelata essere "Stratasys" [52].

All'interno del sito internet dell'azienda, è possibile consultare le caratteristiche dei diversi materiali disponibili. Tra questi, il più consono alla realizzazione del raccordo è risultato essere il Nylon 12 CF, un materiale termoplastico caricato al carbonio. È costituito da una miscela di Nylon 12 e fibra di carbonio al 35%: questa combinazione fa sì che questo materiale abbia eccellenti caratteristiche strutturali e un elevatissimo rapporto rigidità/peso.

Densità $[kg/m^3]$	1070
Modulo elastico $[N/m^2]$	7515000000
Resistenza alla trazione $[N/m^2]$	63400000
Snervamento $[N/m^2]$	75600000

Le caratteristiche del materiale vengono riassunte nella tabella seguente [53].

Tabella 32: Proprietà Nylon 12 CF

Il peso del raccordo è di circa 12 g.

6.1.5 Copri-raccordo



Figura 70: Corpi-raccordo renderizzato

Questo componente viene inserito al fine di migliorare l'aerodinamica che si sviluppa attorno a raccordo. Come quest'ultimo è realizzato in prototipazione 3D, questa volta in semplice materiale polimerico, attraverso il valido servizio offerto da Shapeways, un'altra azienda leader in questo settore [54].



Figura 71: Messa in tavola - Copri-raccordo

Oltre a permettere l'alloggiamento dei profilati di carbonio, presenta 4 fori che ne permettono la chiusura; in questo modo il raccordo risulterà completamente coperto. Il suo peso è particolarmente esiguo: 10 g.

6.1.6 Profilato-supporto motori



Figura 72: Profilato-supporto motori renderizzato

Si tratta di un semplice tubo realizzato in fibra di carbonio come i due longheroni. Presenta un foro per permettere il passaggio dei cavi verso i motori, agganciati alle estremità. Le dimensioni principali vengono mostrate nella messa in tavola seguente.



Figura 73: Messa in tavola - Profilato-supporto motori

Il suo peso ammonta a 50 g.

6.1.7 Assieme motore



Figura 74: Assieme motore renderizzato

Questo assieme racchiude il motore stesso, avvitato su di una piastra di supporto, l'elica e due componenti, realizzati di materiale polimerico in prototipazione 3D: la base e la copertura del motore.



Figura 75: Assieme motore sezionato

In particolare, la base verde, realizza il collegamento fisico tra il profilato in carbonio di supporto, da inserire nella sede cilindrica di diametro 19 mm, e il motore stesso, mediante il supporto.



Figura 76: Messa in tavola - Assieme motore

L'assieme, non considerando motore ed eliche, i cui pesi sono stati considerati nel capitolo precedente, ha un peso complessivo di circa 20 g.

6.1.8 Carrello



Figura 77: Carrello renderizzato

Il carrello è progettato interamente in carbonio e prende ispirazione da quello montato sul Venture, l'APR sviluppato in azienda. Le due piastre, con spessore 1.5 mm, sono unite mediante 4 elementi di carbonio trasversali e sono forate per permettere un certo risparmio in peso. Nella parte inferiore è presente un profilato che per comodità e facilità di costruzione è stato previsto di sezione rettangolare: la sua lunghezza permette di evitare che l'APR si sbilanci in fasi critiche come il decollo o l'atterraggio.



Figura 78: Messa in tavola - Carrello

Il peso del carrello è di 75 g.

6.1.9 Componenti interne fusoliera



Figura 79: Componenti interne e loro alloggiamento

All'interno della fusoliera sono state inserite tutte le componenti indicate nel precedente capitolo, agganciate a due piastre in fibra di carbonio. La loro disposizione ovviamente non è affatto casuale e segue apposite indicazioni:

- la batteria, componente di gran lunga più pesante, deve trovarsi il più vicino possibile al centro di massa in modo da non creare momenti che vadano ad influenzare la dinamica del volo;
- il modulo GPS + Compass viene inserito in posizione avanzata al fine di migliorare la ricezione del segnale e affinchè non sia influenzato e disturbato dalla batteria e dalle antenne;
- 3. le antenne di telemetria e receiver vengono poste nella parte posteriore della fusoliera affinchè non ostacolino il sensore presente sul ventre;
- 4. l'autopilota deve essere montato secondo un preciso verso, indicato sullo stesso;
- 5. il sensore, in questo caso una camera montata in una gimbal, è montato sul ventre della fusoliera in modo da avere una visuale migliore; esso è ancorato alla fusoliera mediante una piastra interna in fibra di carbonio.



Figura 80: Dettaglio sensore inferiore

La disposizione delle componenti è visibile in modo chiaro e dettagliato nella messa in tavola seguente.



Figura 81: Messa in tavola componenti interne

Il peso complessivo di tutte le componenti interne, con i relativi pesi considerati nel capitolo precedente, ammonta a circa 2504.6 g.

6.1.10 APR completo



Figura 82: APR completo - vista isometrica



Figura 83: APR completo - vista frontale

L'APR completo di tutte le parte e le componenti è apprezzabile nelle figure 82 e 83. Per verificare l'ingombro delle eliche è utile un'altra vista superiore del velivolo completo.



Figura 84: APR completo - vista superiore

Viene inserita di seguito anche la messa in tavola del velivolo completo, al fine di comprendere meglio le dimensioni effettive e totali dell'APR progettato.



Figura 85: Messa in tavola APR completo

Il peso complessivo dell'APR è infine di 3994.6 g.

Per quanto riguarda la portabilità, vengono progettati dei contatti elettrici tra fusoliera e semi-ala e tra semi-ala e raccordo che permettono di sganciare rispettivamente la semi-ala e poi il raccordo con il profilato di supporto motori; dal raccordo è inoltre sganciabile anche il carrello. Dal momento che i componenti più ingombranti, fusoliera, semi-ala e braccio di supporto motori, hanno dimensioni confrontabili in una direzione, è possibile sovrapporli in un'apposita valigia e quindi procedere al trasporto.

6.2 Centro di massa

Nelle immagini seguenti viene mostrata la posizione del centro di massa dell'APR completo: esso risulta in perfetta simmetria e praticamente coincidente con la batteria, posizione desiderata.



Figura 86: Posizione centro di massa - vista superiore



Figura 87: Posizione centro di massa - vista laterale



Figura 88: Dettaglio posizionamento centro di massa

Ponendo il sistema di riferimento coincidente con l'estremità anteriore della fusoliera, è possibile identificare la posizione del centro di massa:



Figura 89: Sistema di riferimento

Centro di massa [mm]	
Х	0
Y	20.54
Z	344.63

Tabella 33: Posizione centro di massa

6.3 Analisi strutturale

Una volta definita la geometria dell'APR, l'ingombro delle componenti interne e i materiali da utilizzare per la sua realizzazione, è opportuno validare il modello anche dal punto di vista strutturale. I parametri dei materiali descritti nel sotto-capitolo precedente, vengono inseriti nelle opportune schede dei materiali in SolidWorks e si realizzano quindi 3 diversi studi:

- 1. semiala con longherone anteriore passante e longherone posteriore non passante;
- 2. semiala con longheroni e braccio di supporto motori;
- 3. semiala con longheroni e carrello.

La successione con cui sono realizzati i 3 studi non è casuale: dapprima si è voluto andare a validare il longherone anteriore passante, componente più critico dell'intero assieme, per poi via via aggiungere parti fino ad arrivare alla definizione completa ma semplificata dell'APR. Le analisi strutturali vengono realizzate mediante il solutore Simulation all'interno del software SolidWorks, i cui risultati si sono rivelati congruenti con il modello sperimentale nel caso dei supporti motori della configurazione base, il già citato Venture.

6.3.1 Semi-ala con longheroni

In questo primo studio molto semplice, vengono applicati dei vincoli all'hub della semiala e alle sezioni terminali dei due longheroni, le estremità che vengono inserite all'interno della fusoliera; il carico esterno è invece applicato all'altra estremità del longherone anteriore passante. Considerando un carico dei motori di circa 20 N, tenendo come fattore di sicurezza 2, viene applicato un carico di 40 N. Le applicazioni dei vincoli e del carico risultano evidenti nelle figure seguenti.



Figura 90: Applicazione vincolo – caso 1



Figura 91: Applicazione carichi - caso 1

Affinché non si realizzino compenetrazioni tra i corpi, è stata inserita l'apposita funzione di contatti tra i componenti. Una volta inserite queste informazioni, è possibile procedere creando la mesh, la quale darà particolare attenzione proprio alle superfici di contatto.



Figura 92: Mesh - caso 1

Mesh Dettagli	21
Nome studio	Analisi statica 1 (-Default-)
Tipo di mesh	Mesh di elementi solidi
Mesher usato	Mesh standard
Transizione automatica	Disattivo
Includi loop automatico della mesh	Disattivo
Punti Jacobiani	4 punti
Dimensione dell'elemento	7 mm
Tolleranza	0.35 mm
Qualità mesh	ottima
Nodi totali	243654
Elementi totali	161577
Rapporto di aspetto massimo	41.902
Percentuale degli elementi con rapporto di aspetto < 3	93.5
Percentuale degli elementi con rapporto di aspetto > 10	2.05
% di elementi distorti (jacobiano)	0

Tabella 34: Dettagli mesh - caso 1

Realizzata la mesh è quindi possibile avviare l'analisi statica: anche di assiemi così semplici il tempo per sviluppare le iterazioni e realizzare i contatti senza compenetrazione delle superfici è notevole.

Di seguito vengono mostrate le immagini relative alle caratteristiche di spostamento e deformazione relative a questa prima analisi.



Figura 93: Spostamento - caso 1



Figura 94: Deformazione - caso 1

Dai due risultati si può osservare immediatamente come sia lo spostamento che la deformazione, presentino dei valori piuttosto contenuti. In particolare, parlando del primo, si nota una freccia di soli 5 mm, segno che effettivamente il materiale scelto e il suo spessore, assolvono in maniera adeguata alla funzione.

6.3.2 Semi-ala con longheroni e braccio di supporto motori

Come nel caso precedente, anche ora vengono impostati gli stessi vincoli a longheroni e hub della semiala; essendo presenti il raccordo e il braccio di supporto dei motori, in questo caso cambia il punto di applicazione della forza. Simulando l'applicazione dei due motori, è stato inserito un carico di 20 N per ogni estremità del supporto; il carico è stato raddoppiato sempre per il discorso del fattore di sicurezza: durante una manovra repentina o in caso di forte vento, è possibile che il motore possa generare una spinta doppia rispetto a quella normale. Il dettaglio dell'applicazione delle forze è visibile nella figura sottostante.



Figura 95: Applicazione carichi - caso 2

Una volta applicati i vincoli e le forze, e sistemato come in precedenza il discorso riguardante le superfici di contatto, è quindi possibile realizzare la mesh corrispondente.



Figura 96: Mesh - caso 2

Mesh Dettagli 🥖	
Nome studio	Analisi statica 3 (-Default-)
Tipo di mesh	Mesh di elementi solidi
Mesher usato	Mesh standard
Transizione automatica	Disattivo
Includi loop automatico della mesh	Disattivo
Punti Jacobiani	4 punti
Dimensione dell'elemento	7.2 mm
Tolleranza	0.36 mm
Qualità mesh	ottima
Nodi totali	232778
Elementi totali	152111
Rapporto di aspetto massimo	44.494
Percentuale degli elementi con rapporto di aspetto < 3	92.1
Percentuale degli elementi con rapporto di aspetto > 10	0.914
% di elementi distorti (jacobiano)	0
Mesh non congruente nelle parti fallite in precedenza	Disattivo

Tabella 35: Dettagli mesh - caso 2

Realizzata la mesh, viene eseguita l'analisi statica; di seguito vengono mostrati i risultati in termini di spostamento e deformazione.



Figura 97: Spostamento - caso 2



Figura 98: Deformazione - caso 2

Dal momento che la semiala e i longheroni sono vincolati all'hub, in questo caso si apprezzano valori maggiori per quanto riguarda la freccia e la deformazione rispetto al caso precedente. La prima, comunque, ha un valore molto contenuto, nell'ordine del cm o poco più, 1.2 cm.

6.3.3 Semi-ala con longheroni, braccio di supporto motori e carrello

In questo ultimo caso viene simulato il comportamento del carrello e delle strutture ad esso collegate qualora si realizzi un atterraggio brusco o con una discesa non proprio lenta. Questa eventualità interessa in particolare le situazioni in cui si riscontri un tempo atmosferico non congruo al volo o in caso di failure dell'intero sistema e quindi della macchina tale che possa andare in atterraggio di emergenza.

Il carico applicato al carrello è normalmente la reazione che il suolo esercita sullo stesso; al fine di simulare un atterraggio diverso dalla condizione normale, viene impostata una forza di 40 N su ogni carrello, assimilabili circa al doppio del peso dell'APR stesso. Nella figura seguente viene mostrata l'applicazione del carico sotto al pattino.



Figura 99: Applicazione carichi - caso 3

Come nei casi precedenti, anche ora viene mostrata la mesh che si ottiene e il dettaglio dei valori trovati.



Figura 100: Mesh - caso 3

Mesh Dettagli 🥖 👂	
Nome studio	Analisi statica 4 (-Default-)
Tipo di mesh	Mesh di elementi solidi
Mesher usato	Mesh standard
Transizione automatica	Disattivo
Includi loop automatico della mesh	Disattivo
Punti Jacobiani	4 punti
Dimensione dell'elemento	7.5 mm
Tolleranza	0.375 mm
Qualità mesh	ottima
Nodi totali	224015
Elementi totali	143929
Rapporto di aspetto massimo	59.242
Percentuale degli elementi con rapporto di aspetto < 3	86.7
Percentuale degli elementi con rapporto di aspetto > 10	5.22
% di elementi distorti (jacobiano)	0
Mach nan canaruanta nalla perti fellita in procodanze.	Dicettivo

Mesh non congruente nelle parti fallite in precedenza Disattivo

Tabella 36: Dettagli mesh - caso 3

La soluzione dell'analisi statica mostra i risultati in termini di spostamento e deformazione risultanti.



Figura 101: Spostamento - caso 3



Figura 102: Deformazione - caso 3

Per quanto riguarda lo spostamento, esso è nell'ordine dei 4 mm, inferiore rispetto a quanto trovato nel caso precedente: il carico in questo caso si sviluppa su di un corpo direttamente collegato al longherone anteriore, presentando quindi un braccio inferiore e scaricando tutta la forza direttamente sullo stesso longherone. Tutto ciò fa in modo che si generi una freccia inferiore.

La deformazione maggiore invece si riscontra all'hub della semiala e nel raccordo, mantenendo comunque dei valori più che accettabili.

Conclusioni



Figura 103: Render finale

Lo studio preliminare di questo nuovo tipo di APR ha richiesto un approccio interdisciplinare che coprisse vari ambiti, dall'aspetto normativo all'aerodinamica, dai materiali alle strutture, tutti aspetti di grande importanza. Se al momento questo progetto risulta adeguato a questi anni e per certi versi innovativo, il progresso tecnologico e i nuovi orizzonti che si stanno aprendo dal fronte normativo, possono fare in modo che sia potenzialmente aggiornabile e rivedibile in molti sui aspetti.

Stando allo stato dell'arte, l'APR progettato ha tutte le caratteristiche per collocarsi a metà strada tra un mezzo ad ala rotante ed uno ad ala fissa, primo vero obiettivo di questo progetto di Tesi. È ovviamente pensato per il volo traslato dal momento che in caso di hover ricalcherebbe pienamente il comportamento di un classico multirotore. La facilità di costruzione e soprattutto l'efficienza durante il volo, rendono questo APR un valido prodotto che superi le complicazioni dell'ala fissa e soprattutto l'eventuale transizione da volo verticale a volo orizzontale. Il risparmio nei consumi è stato quantificato nell'ordine del 17-18%, garantendo quindi di riuscire a raggiungere i requisiti in termini di autonomia prefissati. Il requisito della distanza è strettamente legato al tempo in volo e al tipo di missione da portare a compimento, ragion per cui risulti un requisito molto complicato da indagare, a meno che si realizzino delle prove sperimentali. Essendo questo un progetto preliminare, non si è arrivati alla costruzione del mezzo, quindi questo aspetto dovrà essere ulteriormente approfondito.

Gli aspetti considerati, dall'aerodinamica al peso e quindi l'uso dei materiali, hanno comunque mostrato che è possibile perseguire con successo i requisiti. L'aspetto aerodinamico, in particolare, necessiterà in futuro di studi più approfonditi, soprattutto riguardanti l'interazione con il flusso generato dai 4 rotori.

Rimanere sotto i 4 kg di peso si è rivelato il requisito più complicato da perseguire: avere un mezzo con queste dimensioni ha richiesto una ricerca approfondita sui materiali da poter utilizzare, cercando di coniugare componenti "standard" come i classici profilati in fibra di carbonio e altri realizzati in EPS o in Nylon 12 CF. La ricerca di questi ultimi, in particolare, è stata molto utile per andare ad apprendere e consolidare nuove tecniche realizzative, come ad esempio l"additive manufacturing", tecnologia in continua evoluzione che sta portando le aziende a riconsiderare l'intero processo produttivo.

Come detto in precedenza, rilievo è stato dato anche all'aspetto strutturale del progetto, verificando con successo l'integrità del mezzo in tre diverse prove statiche. L'unione del classico e del nuovo ha reso possibile creare questo prodotto che ad oggi vede pochi prodotti simili sul mercato, aspetto da non sottovalutare in un panorama saturo di APR di quasi ogni forma e genere.

Parlando dei risvolti futuri, il progetto descritto in questa Tesi potrà vedere ulteriori aspetti innovativi, primo fra tutti, a mio parere, la possibilità di modificare il calettamento delle due semi-ali durante il volo traslato: poter controllare l'angolo delle superfici aerodinamiche mediante un semplice comando, permetterà di trovare in ogni situazione di volo e per le diverse missioni il giusto compromesso tra portanza e resistenza. Particolare attenzione dovrà essere però rivolta alla complessità del progetto e alla relativa affidabilità, aspetti e requisiti perseguiti nello svolgimento di questa Tesi e fondamentali in ogni progetto.

133
Bibliografia e sitografia

- Regolamento "Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto", Edizione 2, Emendamento 4, ENAC, 21 maggio 2018.
- [2] Circolare "Mezzi aerei a Pilotaggio Remoto, Centri di Addestramento e Attestati Pilota", ENAC, 16 settembre 2016.
- [3] Commission Staff Working Document: Impact assessment, European Commission, 07 dicembre 2015.
- [4] JARUS Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems, jarus-rpas.org.
- [5] Regolamento CE N. 216/2008, European Commission, 20 febbraio 2008.
- [6] Pro S3, http://www.pros3.eu/.
- [7] Capitolato Tecnico "Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto di classe MINI per le esigenze di impiego di prossimità dell'Arma dei Carabinieri", Comando Generale dell'Arma dei Carabinieri, marzo 2018.
- [8] Circolare "Mezzi aerei a Pilotaggio Remoto, Centri di Addestramento e Attestati Pilota", ENAC, 16 settembre 2016.
- [9] "La Croce Rossa Italiana sceglie Venture". http://www.pros3.eu. Web. 11 novembre 2017.
- [10]"I droni impiegati nelle operazioni di soccorso". http://www.vigilfuoco.it. Web. 31 agosto 2016.
- [11]"Droni e sicurezza: le norme previste". http://www.poliziadistato.it. Web. 10 luglio 2015.
- [12] D.L. 18 febbraio 2015, n.7, in materia di "Misure per il contrasto del terrorismo".

- [13] "Wavesight versione AGRI multispettrale e multisensore". http://www.pros3.eu. Web. 25 agosto 2017.
- [14] Masali, Luca. "Milano: corso di aerofotogrammetria con drone l'8 luglio". https://www.dronezine.it. Web. 22 giugno 2016.
- [15]Ricca, Jacopo. "Torino, 200 droni luminosi al posto dei fuochi per la festa di San Giovanni". http://torino.repubblica.it. Web. 22 marzo 2018.
- [16]"Torino sperimenta i droni luminosi al posto dei fuochi artificiali per San Giovanni 2018". http://www.quotidianopiemontese.it. Web. 22 marzo 2018.
- [17] FPV Model, https://www.fpvmodel.com/.
- [18] Gryte K., Hann R., Alam M., Rohac J., Johansen T.A., Fossen T.I. "Aerodynamic modeling of the Skywalker X8 Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicle", 2016.
- [19] Airfoil Tools, http://airfoiltools.com/.
- [20] Materiali didattico: "Modellazione, simulazione e sperimentazione dei sistemi aerospaziali", Paolo Maggiore, 2016.
- [21] "Come scegliere i motori brushless per drone".

http://www.projectems.it/motori-brushless-per-drone/. Web. 19 ottobre 2017.

- [22] T-Motor, http://store-en.tmotor.com/.
- [23] DongYang Smart Technology, http://www.dys.hk/.
- [24] Mad Components, http://madcomponents.co/.
- [25] Dualsky, http://www.dualsky.com/.
- [26] "Come scegliere le eliche per il drone".

http://www.projectems.it/come-scegliere-elica-per-il-drone/. Web. 23 ottobre 2017.

- [27] Materiale didattico: "Meccanica del volo dell'elicottero", Giorgio Guglieri, 2017.
- [28] T-Motor propeller, http://store-en.tmotor.com/goods.php?id=381.

- [29] "Come scegliere ESC per il drone". http://www.projectems.it/come-scegliere-escper-il-drone/. Web. 20 ottobre 2017.
- [30] Gens Ace battery, http://www.gensace.de/uav-lipo.
- [31]B2B Drone, http://www.b2bonline.it/it/lipo-6-celle/117-tattu-10000mah-222v-25c-6s1p-lipo-battery-pack-6928493300091.html.
- [32] PixHawk autopilot, https://pixhawk.org/.
- [33]"Guida passo per passo al setup di PixHawk con Arducopter 3.3.X". http://www.projectems.it/guida-passo-per-passo-al-setup-di-pixhawk-conarducopter-3-3-x/. Web. 24 febbraio 2016.
- [34] Unmanned Tech,

https://www.unmannedtechshop.co.uk/unmanned-pixhawk-autopilot-kit/.

- [35]3D Robotics, https://3dr.com/.
- [36] UAV Systems International,

https://www.uavsystemsinternational.com/product/3dr-ublox-gps-compass/.

- [37] Ardupilot GPS & Compass module, http://ardupilot.org/copter/docs/commoninstalling-3dr-ublox-gps-compass-module.html.
- [38] "SF11 Laser Altimeter Product Manual", Lightware Optoelectronics, 2016.
- [39] Sparkfun, https://www.sparkfun.com/products/10644.
- [40] Ardupilot Power module,

http://ardupilot.org/plane/docs/common-using-a-current-sensor.html.

- [41] Oscar Liang, https://oscarliang.com/buzzer-quadcopters/.
- [42] Ardupilot Radio & Telemetry,

http://ardupilot.org/copter/docs/common-3dr-radio-v1.html.

- [43] "Quick Start Guide", 3D Robotics, 28 ottobre 2013.
- [44]Hobbyking,

https://hobbyking.com/it_it/turnigy-9x-2-4ghz-8ch-receiver-v2.html.

- [45] "Passato, presente e futuro: integrazione sensori negli APR", FlyTop, 25 settembre 2015.
- [46] DoItYourself Drones, http://kahone.com/.
- [47] Fpv, https://fpv.tv/pixhawk-px4-flight-controller-for-multirotors/.
- [48] Wikipedia Polistirene,

 $https://it.wikipedia.org/wiki/Polistirene \# Polistirene _ Espanso _ Sinterizzato.$

[49] Coleman, Benson. "How to Make a Drone/UAV".

https://www.robotshop.com/blog/en/robots/gorobotics/tutorials/how-to-makea-drone-uav. Web. 29 ottobre 2014.

[50] Wikipedia – Fibra di carbonio,

 $https://it.wikipedia.org/wiki/Fibra_di_carbonio.$

- [51]"Technical data sheet M55J Data Sheet", Torayca.
- [52] Stratasys, http://www.stratasys.com/.
- [53]Zare, http://www.zare.it/materiali/nylon12cf.
- [54] Shapeways, https://www.shapeways.com/.