



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E AEROSPAZIALE

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

**Progetto preliminare di un drone per la
somministrazione di prodotti fitosanitari in
vigna**

Relatori:

**Enrico Zappino
Matteo Filippi**

Candidato:

Fabrizio Cuniberti Mighetti

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

Sommario

Lo scopo di questo report è progettare, mediante procedure e tecniche innovative, un SAPR (Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto) in grado di distribuire prodotti fitosanitari in vigneti con forte pendenza.

Con il cambiamento climatico in atto, la ricerca di prodotti alimentari sempre più accurata da parte delle persone, l'introduzione di metodi di lavorazione innovativi e sostenibili, la direzione generale è orientata alla produzione di prodotti con caratteristiche speciali: questo riguarda soprattutto il campo vitivinicolo. In quest'ottica si sta assistendo a una ripopolazione di vigneti in terreni caratterizzati da forte pendenza. Questi vigneti si distinguono per la produzione delle migliori uve – grazie alla maggiore quantità di raggi solari che catturano – e per la difficile gestione lavorativa, con conseguente aumento dei costi di manutenzione. Nonostante il prodotto rappresenti l'eccellenza, è difficile venderlo proporzionalmente a un prezzo più alto; per questo, si sta creando una linea di valorizzazione per i vigneti in determinate condizioni a livello giuridico. Con il decreto 6899/2020, in attuazione della Legge n.238 del 2016 c.d. Testo Unico del vino, è presente un movimento per valorizzare e sostenere l'importante patrimonio dei vigneti eroici: "Vigneti che ricadono in aree soggette a rischio idrogeologico, o situati in aree dove le condizioni orografiche creano impedimenti alla meccanizzazione, in zone di particolare pregio paesaggistico e ambientale, nonché i vigneti situati nelle piccole isole". Con questi riconoscimenti e aiuti, il campo ingegneristico deve pensare a un sistema meccanico che assista i vignaioli mantenendo uno standard qualitativo elevato e bassi costi di lavorazione.

Il metodo di progettazione utilizzato in questo report segue un iter che parte dall'analisi dell'esigenza, passa dal progetto preliminare e concettuale per verificarne la fattibilità, per poi arrivare alla progettazione dettagliata. Il tutto senza trascurare l'aspetto economico che, al pari delle stime di peso, propulsione e modelli, non è una conseguenza del design ma una variabile essenziale.

Come il XX secolo ha visto l'alba dei sistemi volanti nello spazio, nel XXI avremo una rivoluzione simile per il mondo del volo autonomo. Il risultato del report è la progettazione di un sistema che rispecchia le specifiche date e le caratteristiche meccaniche volute. L'SAPR in questione è progettato per volare sopra il vigneto con la capacità di distribuire prodotto fitosanitario, in modo efficace, avvolgendo la pianta grazie a due bracci laterali.

"Nonno! Nonno! Non trovo il fanalino posteriore della vespa, non lo fanno più!"
"Non preoccuparti, se non si trova lo facciamo."
"Ma lo possiamo fare noi?"
"Tutto si può fare Fabri."
A mio nonno Carlo

Indice

1	ANALISI PRELIMINARE	5
1.1	Requisiti e assunzioni preliminari	6
1.1.1	Introduzione al mondo vitivinicolo	6
1.1.2	Necessità operative	9
1.1.3	Misure tipiche di un vigneto, il sesto d’impianto	11
1.1.4	Conclusione: requisiti del progetto	12
1.1.5	Profilo di missione	12
1.2	Analisi Statistica	13
1.2.1	Stato dell’arte multicotteri	13
1.2.2	Stima dei valori per interpolazione	15
1.3	Normative attuali	18
2	PROGETTO CONCETTUALE	21
2.1	Configurazione del velivolo	22
2.1.1	Configurazioni UAV in commercio	22
2.1.2	Configurazione scelta: UAV ad ala rotante	24
2.2	Macro sistemi dell’UAV	26
2.2.1	Batteria	26
2.2.2	Catena di propulsione	27
2.2.3	Sistemi propulsivi in commercio	29
2.2.4	Sistema di distribuzione fitosanitario	30
2.2.5	Struttura e Sistemi annessi	31
2.3	Analisi Iterativa MTOM	31
2.4	Analisi costo UAV	34
2.4.1	Trattamento con cannone	35
2.4.2	Distribuzione trattamento a mano	35
2.4.3	Distribuzione tramite UAV	35
3	PROGETTAZIONE DETTAGLIATA	37
3.1	Propulsione e avionica di bordo	38
3.1.1	Controllore di volo Pixhawk 2.1	38
3.1.2	Motore T-Motor U15II KV80	39
3.1.3	Elica G40x13.1	40
3.1.4	ESC FLAME 180A 12S	40
3.1.5	Funzionamento ESC	41
3.2	Batteria installata	42
3.2.1	Dimensionamento Batteria	43
3.2.2	Dimensioni batteria sistema	46
3.3	Dinamica del volo	46
3.3.1	Angoli e matrice di rotazione	47
3.3.2	Equazioni del moto	48
3.3.3	Equazioni del moto semplificate	51
3.3.4	Sistema di controllo dell’APR	52
3.4	Sistema di distribuzione	54

3.4.1	Scelta ugello	54
3.4.2	Circuito Idraulico	56
3.4.3	Predisposizione ugelli soluzione 1	57
3.4.4	Predisposizione ugelli soluzione 2	59
3.4.5	Predisposizione ugelli soluzione 3	61
3.4.6	Sistema di distribuzione scelto e implementato	66
3.5	Telaio	67
3.5.1	Bracci del sistema	68
3.5.2	Struttura centrale	73
3.5.3	Serbatoio	74
3.5.4	Cavalletto di atterraggio	75
3.5.5	Dettagli assieme	75
3.6	Geometria finale	76
3.6.1	Tavole dell'assieme	78
3.6.2	Controllo dell'assieme	79
3.6.3	Baricentro e momenti di inerzia	81
4	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	83
A	TABELLE COMPLETE	87
B	Codici MATLAB	91
B.1	Analisi statistica	92
B.2	Progetto Concettuale	94
B.3	Dimensionamento Batterie	97
B.4	Controllo Finale	101

Capitolo 1

ANALISI PRELIMINARE

Partendo dall'analisi di mercato è possibile iniziare a stimare le caratteristiche di alto livello di cui il velivolo dovrà disporre. Dopo aver individuato un sistema idoneo, si passerà ad un'analisi statistica corrispondente alla categoria scelta, che permetterà una stima dei valori delle caratteristiche essenziali del sistema da progettare. Ovviamente questi valori non saranno quelli finali, ma dovranno essere reiterati e modificati nel corso del progetto.

1.1 Requisiti e assunzioni preliminari

In questa sezione si analizzano le caratteristiche e l'ambiente di lavoro del sistema che si progetta. Si espone la definizione di prodotto fitosanitario e si analizzano le problematiche relative alla sua distribuzione. Nella parte conclusiva della sezione si definiscono i requisiti che il sistema in analisi deve avere.

Un prodotto fitosanitario è un prodotto pronto all'impiego, previa diluizione in acqua (salvo eccezioni), utilizzabile per proteggere e conservare i vegetali (e i prodotti derivati) o influire sui suoi processi vitali come la crescita. Per quanto concerne il vigneto, i prodotti fitosanitari sono ad oggi essenziali e obbligatori per la produzione dell'uva. Data la loro pericolosità che può causare inquinamento, contaminazioni o accumuli in riferimento all'uomo, alla flora, alla fauna e, più in generale all'ambiente, la loro produzione, l'immissione sul mercato e il loro uso è regolamentato da specifiche norme sovranazionali, nazionali e locali. La distribuzione dei prodotti fitosanitari causa problemi che verranno esplicitati in seguito.

Le perdite che si verificano durante la distribuzione dei trattamenti fitosanitari in vigneto (deriva del prodotto) è stimata tra il 40 e l'80% in funzione del sistema di trattamento e del periodo vegetativo della pianta (a fine stagione la vegetazione è più sviluppata e si ha meno perdita) [19].

Negli ultimi anni sono stati progettati nuovi macchinari per limitare questo effetto negativo, con l'obiettivo sia di migliorare la qualità del trattamento, sia di ridurre l'impatto ambientale che ne consegue. Questi nuovi sistemi hanno risolto i problemi diminuendo le perdite solo per i vigneti trattabili a filare per filare. Resta un limite che fisicamente è difficile da superare per il trattore: le pendenze elevate. In vigneto con pendenza elevata si utilizzano ancora sistemi di vecchia generazione con perdite elevate.

I problemi ambientali causati dalla deriva di prodotti fitosanitari sono i seguenti: degradazione dell'ambiente, inquinamento del suolo e delle acque, residui nella catena alimentare e compromissione dell'equilibrio ecologico. Oltre a questo, c'è anche il problema della compattazione del suolo, problema assolutamente non trascurabile per le coltivazioni: il passaggio frequente dei mezzi pesanti porta a una situazione sempre più precaria della superficie erbosa, che provoca un impoverimento del terreno.

Per quanto concerne l'utilizzo dei trattori subentra anche il lato sicurezza, non trascurabile visti i frequenti incidenti che capitano nel settore. A fronte di un dato ufficiale di circa 200 eventi mortali all'anno a metà degli anni '70, oggi si contano ancora più di 120-140 decessi/anno rilevati dal web, mentre il numero reale non può che essere più alto, nonostante tutti gli intensi e prolungati sforzi degli Enti e Organismi preposti alla sicurezza del lavoro in agricoltura [24].

Una valida soluzione per risolvere questi problemi potrebbe essere quella di utilizzare sistemi aeromobili a pilotaggio remoto nella lotta fitosanitaria. Questa soluzione, in vigneti con pendenze elevate, potrebbe anche essere conveniente dal punto di vista economico. Gli svantaggi dell'utilizzo di questo sistema sono legati, invece, alla scarsa capacità di prodotto trasportabile dallo stesso, il tempo di volo limitato, le attrezzature poco testate e il costo di progettazione elevato.

Di seguito si analizza il mondo vitivinicolo, i droni in commercio per l'agricoltura e successivamente si definiscono i requisiti di base del progetto.

1.1.1 Introduzione al mondo vitivinicolo

Nell'arco dell'anno vegetativo della pianta vengono eseguiti dai 10 ai 15 trattamenti con prodotti fitosanitari, questo sia per migliorare la produzione dal punto di vista della qualità, sia per la necessità di difesa da patogeni esterni. Il numero di trattamenti da effettuare oscilla in funzione delle precipitazioni atmosferiche; infatti, in caso di annate molto piovose, occorre aumentare il trattamento a causa del risciacquo che l'acqua piovana provoca alla miscela fitosanitaria precedentemente distribuita sulle foglie, vanificandone l'effetto.

Di seguito si analizzano le varie tipologie di macchine irroratrici trasportate dai trattori, attualmente in uso, poiché esse rappresentano la base sulla quale si vuole operare per trovare un idoneo metodo di lavoro e per realizzare un nuovo sistema di distribuzione.

Trattori e irroratori presenti sul mercato

Allo stato attuale, se il vigneto non presenta problemi legati a ripidità del terreno e a distanza tra i filari troppo limitata, per la distribuzione fitosanitaria vengono adoperati irroratori trainati da trattori. Va fatto presente che la maggior parte dei filari è di questa tipologia, negli ultimi anni si sono allargate anche le ultime vigne che presentavano basse pendenze, ma limitato distanziamento tra i filari per il passaggio del trattore. Si utilizzano quindi trattori che passano tra i filari e che hanno con sé il sistema di distribuzione. I sistemi di distribuzione si dividono in due categorie: atomizzatori (irroratori meccanici: la miscela in pressione viene fatta uscire attraverso ugelli idraulici) e in nebulizzatori (irroratori pneumatici: il liquido viene investito da una corrente d'aria ad alta velocità e frantumato), come i seguenti tipi:

- Atomizzatore convenzionale, figura 1.1. Questi sono di tecnologia molto semplice, sviluppano una portata d'aria che fuoriesce radialmente e che incontra una corona di ugelli che rilasciano il prodotto. Gli ugelli posti a ventaglio provvedono alla polverizzazione meccanica della miscela, mentre il ventilatore assiale fornisce il flusso d'aria necessario al trasporto delle gocce. Questi sistemi sono economici, irrorano alti volumi di miscela (tra i 500 e i 1500 l/ha), ma presentano un grosso problema di deriva a causa del flusso che non è guidato e della scarsa omogeneità della deposizione di miscela.



Figura 1.1: Atomizzatore Convenzionale

- Atomizzatore a torretta, figura 1.2. È differente, rispetto al precedente sistema, perché cerca di incanalare il flusso in modo più lineare, anche se il ventilatore è sempre assiale, e di accoppiare maggiormente la forma della pianta con quella dell'irroratrice uniformando la deposizione lungo l'altezza della stessa. In questa soluzione l'obiettivo è quello di diminuire la deriva e migliorare la deposizione del trattamento.



Figura 1.2: Atomizzatore a Torretta

- Nebulizzatore semplice e a flussi, figura 1.3. Questi due modelli si differenziano per avere bocche fisse nel primo caso e orientabili nel secondo. Meccanicamente presentano un ventilatore centrifugo da cui si dipartono i tubi di alimentazione dei diffusori. Rispetto ai modelli

precedenti, in questo caso si ha la possibilità di posizionare gli erogatori per realizzare un deposito omogeneo e contenere le perdite. Queste macchine sono note come irroratrici a basso volume perché impiegano basse quantità di miscela (tipicamente $150 \div 250$ l/ha) per ottenere buone deposizioni.



Figura 1.3: Nebulizzatore Semplice e a Flussi

- Nebulizzatori scavallanti, figura 1.4. Meccanicamente lavorano come il modello sopracitato, ma con la struttura che scavalla il vigneto in modo da avvolgere la vegetazione e trattare nella stessa passata entrambi i lati della pianta. Questa soluzione è più complessa ma buona da molti punti di vista, tra cui oltre quello della riduzione della deriva, quello della diminuzione del numero di passaggi in vigneto.



Figura 1.4: Nebulizzatore scavallante

- Nebulizzatori a tunnel, figura 1.5. Questi sono l'evoluzione dei nebulizzatori scavallanti, capaci di recuperare una parte della miscela fitoterapica che manca il bersaglio e riutilizzarla successivamente.



Figura 1.5: Nebulizzatore a Tunnel

Resta il problema delle pendenze. Il trattore non viene utilizzato dove sono presenti vigneti impervi. In questa tipologia si fa uso di:

- Irroratrici manuali (lance portatili), figura 1.6. Queste presentano un costo di macchinario bassissimo, ma per ovvi motivi un costo lavorativo molto elevato. Nel'attuale sistema economico è quasi impossibile lavorare il vigneto a mano per la frequenza di trattamenti da effettuare.



Figura 1.6: Irroratrice Manuale

- Irroratrici a cannone, figura 1.7. Queste sono le macchine più utilizzate in situazione di pendenza elevata. Vengono montate sul trattore che passa nella strada appositamente spianata e allargata ogni 5/10 filari, lavorano da lontano con l'obiettivo di irrorare appunto dai 5 ai 10 filari per passaggio. Hanno il grosso problema di creare una notevole deriva e una bassa performance nella distribuzione del prodotto. È probabile che avvenga un taglio di produzione di questo tipo di macchina, avendo i problemi sopra elencati. Tuttavia, attualmente, è ancora in uso per la mancanza di un sistema che lo sostituisca nello svolgere questi lavori.



Figura 1.7: Irroratrice a Cannone

Il sistema in analisi non vuole sostituire i sistemi meccanizzati con ottimo rendimento, ma piuttosto quelli solitamente utilizzati in vigneti che presentano pendenze elevate, trovando un sistema virtuoso, economico e performante allo stesso tempo.

1.1.2 Necessità operative

In questa sezione si espone il confronto fra tre realtà vinicole che operano nella zona delle Langhe per indagare circa le necessità non soddisfatte dall'attuale sistema. In una prima parte si riportano gli specifici casi e nella seconda viene analizzata la visione d'insieme dei vigneti della zona.

Poderi Roccanera

La storia di questa famiglia di viticoltori inizia nel 1919, quando il trisavolo Negro Carlo acquistò il terreno sulla collina di San Pietro a Cossano Belbo. La produzione si concentra, in particolare, su varietà autoctone come Favorita, Moscato, Barbera, Nebbiolo e Dolcetto. Dal 2018 sono entrati in azienda anche i giovani Asia e Alessandro i quali, pur essendo legati alle tradizioni di famiglia, portano all'azienda idee e progetti innovativi, ed è proprio grazie ad Alessandro che si sono cercate soluzioni alternative [25].

Alessandro gestisce la coltivazione di 20 ettari di vigneto tra i 250 e 500 metri di quota. Su 20 ettari di vigneto, 4 sono troppo ripidi per effettuare il trattamento filare per filare e quindi si utilizza l'atomizzatore a cannone, precedentemente trattato nel capitolo 1.1.1, con i suoi pregi e difetti.

Vista la grossa realtà e le spese sostenute negli anni per attrezzature agricole, Alessandro crede che il drone, nel suo caso, possa essere utilizzato nei suoi vigneti scoscesi, per migliorare la qualità del trattamento e per diminuire l'impatto ambientale derivante dalle perdite dell'atomizzatore a cannone.

La Bruciata di Bosio Oscar

L'azienda "Oscar Bosio" è situata a Valdivilla, una frazione situata sulle armoniose colline di Santo Stefano Belbo. Qui la famiglia Bosio acquistò nel 1954 l'azienda e iniziò a produrre uve moscato. Da allora sono passate tre generazioni, che incarnano la passione per la vigna e il rispetto per la terra [23].

Edoardo, figlio di Oscar, nei 18 ettari di vigneto produce sia vini bianchi che rossi delle migliori denominazioni delle Langhe. Pratica la lotta integrata, nel rispetto dell'ambiente, riducendo al minimo i trattamenti e lasciando i filari inerbiti.

Crede fortemente nell'efficacia dei trattamenti fitosanitari dati in modo specifico pianta per pianta, questo l'ha portato a rendere trattorabili tutte le vigne in suo possesso. Negli ettari di sua proprietà ha una minuscola percentuale di terreno con pendenze elevate e quindi non è direttamente interessato a cambiare il suo metodo di lavoro.

Edoardo però fa presente che è molto importante che il trattamento venga dato in seguito alla pioggia, tuttavia il terreno è fangoso e il trattore non può lavorare a causa dell'instabilità. Inoltre, per dare i trattamenti a tempo debito, si potrebbe prevedere di effettuarli di notte, cosa irrealizzabile con il trattore. L'uso del drone potrebbe risolvere entrambi i problemi.

Tojo Vini

L'Azienda di Bocchino Vittorio è situata nel centro dei luoghi pavesiani, tra le Langhe e il Monferrato, dalla sua cantina si vede la Gaminella e seduti fra i suoi filari si può godere il tramonto sulla collina dei "Mari del Sud"[28].

Francesco, figlio di Vittorio, è un forte sostenitore del lavorare bene durante l'anno in vigneto, questo per avere un'uva sana e bella necessaria per fare un ottimo vino. Nessuno dei 5 ettari che possiede è trattorabile, questo lo porta a un lavoro lungo e faticoso per curare il vigneto con trattamenti di alta qualità.

Francesco è molto interessato all'idea di un nuovo sistema per effettuare i trattamenti necessari, garantendo quindi uno standard di qualità elevato e riducendo il faticoso lavoro manuale. È proprio lui a farci conoscere la realtà dei sorì eroici.

Sorì eroici

In piemontese il termine significa letteralmente soleggiato, la parola viene quindi utilizzata per indicare quelle aree del territorio particolarmente vocate alla viticoltura in quanto molto soleggiate. I sorì sono quindi vigneti esposti nei versanti soleggiati (Sud e Est) con pendenze elevate (più aumenta la pendenza e più il vigneto prende sole).

Il nuovo marchio "Sorì eroici" nasce per riconoscere le differenze tra i vigneti in termine di pendenza ed esposizione. Questo è importante per evidenziare le differenze a livello di difficoltà di lavorazione e soprattutto di qualità del prodotto, per dare un valore in più a questi particolari vigneti. In questi ultimi decenni sono stati tolti vecchi vigneti senza più installarne di nuovi, a causa della notevole difficoltà riscontrata nella lavorazione, con conseguente insostenibilità economica. Per potersi fregiare del nuovo marchio "Sorì eroici" gli appezzamenti hanno due possibilità: per essere automaticamente inserito non deve avere esposizione nel versante nord e deve avere una pendenza pari o superiore al 40%, mentre per le pendenze minori vengono valutate altre condizioni, come ad esempio, l'impossibilità di utilizzare mezzi meccanici per le lavorazioni.

Questo riconoscimento è molto utile ai fini della tesi, oltre a dimostrare la necessità di sistemi che vadano a supportare una coltura più complessa, anche per avere un riferimento di quanti vigneti possiedano caratteristiche tali per cui possa essere usato il sistema in analisi.

1.1.3 Misure tipiche di un vigneto, il sesto d'impianto

Come già anticipato, si stanno ora ponendo i requisiti di base del progetto. Tra questi troviamo di sicuro le dimensioni massime del drone.

Per individuare queste misure si è fatto ricorso all'aiuto dell'azienda Tojo, esposta al capitolo 1.1.2. Francesco ha mostrato la disposizione rettangolare dei suoi vigneti, vedi figura 1.8, comune in altri appezzamenti.



Figura 1.8: Vigneto tipico - Misure

La forma dell'appezzamento è delimitato da strade più grosse, definite in piemontese 'caussagne' dove è possibile passare con il trattore e generalmente di larghezza pari a $2.5m$. Mentre tra i filari la larghezza varia tra $1.50 \div 2.00m$, la distanza è sempre stato un compromesso per consentire la facilità di lavorazione e mantenere una certa quantità di vigne. Per massimizzare la produzione, si impiantavano più viti possibili e la distanza tra una fila e l'altra era pari alla larghezza dell'animale (tra i più comuni si trovano il cavallo o il bue) che passava all'interno, per supportare il contadino nei lavori di forza.

Per consentire al drone di operare in questo ambiente le misure non devono superare $1200 \times 1200mm$ nel caso in cui ci siano corpi che passano tra i filari e al massimo di $3000 \times 3000mm$ nel caso di corpi che sorvolino il filare. Il primo requisito è legato alla necessità del drone di passare tra i filari senza incastrarsi con l'apparato fogliare. Il secondo è legato al fatto che oltre all'appezzamento rettangolare è possibile trovare bosco o muraie, queste non hanno misure specifiche di altezza. Per essere conservativi si ipotizza di non dover operare oltre la strada principale al di fuori del vigneto, azione che potrebbe implicare il rischio di una collisione del drone, poiché il sistema è molto grande.

In questa sezione si tratta anche della quantità di prodotto fitosanitario necessario alla distribuzione per trattare un ettaro di terreno. È molto difficile avere una stima della quantità di acqua necessaria poiché dipende da molti fattori, sicuramente tra questi c'è il diametro delle gocce. Le gocce di minore diametro sono più facilmente trasportabili verso il bersaglio e quindi sono adatte quando la chioma da trattare è di ampie dimensioni e di forma irregolare, consentendo di realizzare migliori trattamenti. In particolare, questo è utile nel caso in cui sia necessario un elevato effetto coprente, cioè quando il principio attivo del trattamento debba agire per contatto diretto sul patogeno. Oltre a questo, la goccia di minor diametro consente di impiegare minori quantità di acqua e di realizzare i cosiddetti trattamenti a basso volume. In genere sul vigneto in pieno vigore vegetativo, con un trattamento a basso volume, si distribuiscono non più di $300 - 400l/ha$ di miscela (tipicamente $250l/ha$).

Essendo un vigneto di un ettaro costituito da circa $5000m$ lineari di vitigno: un terreno di 1 ettaro approssimato a un quadrato $100 \times 100m$ con filari posti a 2 metri di distanza uno dall'altro, sono circa 50 filari da $100m$ l'uno. Considerando di riuscire a ottenere una goccia con diametro fine e diluendo il prodotto da distribuire in $250l/ha$ saranno necessari circa $0.05l/metrolineare$.

1.1.4 Conclusione: requisiti del progetto

Visti i bisogni rilevati da letteratura e da realtà vitivinicole operative, l'obiettivo sarà quello di trovare un sistema che riesca a distribuire prodotti fitosanitari in vigneti che presentano pendenze elevate.

L'aeromobile a pilotaggio remoto sembra una soluzione alternativa a quelle attuali e potrebbe rispondere a tali bisogni. L'obiettivo della tesi è quello di progettare un sistema che riporti i vantaggi riportati di seguito:

- Lavorare su pendenze elevate;
- Lavorare in ambienti bagnati e scivolosi;
- Lavorare in sicurezza;
- Distribuire i prodotti vicino alla pianta mantenendo un'alta qualità e poca deriva;
- Distribuire i prodotti nel momento giusto, anche nella notte dopo la pioggia;
- Eliminazione del problema del compattamento del suolo;

Gli svantaggi del drone rispetto al trattore non sono difficili da immaginare: il trattore è una macchina terrestre e quindi ha un rendimento più elevato, può trasportare carichi superiori ed è utilizzato da decenni.

I requisiti che il drone deve avere sono:

- Capacità minima di 25 lt di prodotto fitosanitario netto: questo prodotto è stato calcolato per distribuire prodotto a 500 metri lineari di vigneto, giustificato al capitolo 1.1.3;
- Le dimensioni devono essere al massimo di $1200 \times 1200 \text{ mm}$ nel caso in cui ci siano corpi che passano tra i filari e al massimo di 3000×3000 nel caso di corpi che sorvolino il filare. Queste misure sono giustificate al capitolo 1.1.3.
- Le perdite e quindi la deriva devono essere minime;
- La durata della missione deve essere sufficiente a garantire la distribuzione del prodotto per 500 metri lineari e per andare e tornare dalla base di partenza dove si può effettuare un cambio batteria/prodotto.

1.1.5 Profilo di missione

In questa sottosezione si cerca di analizzare le varie e principali fasi di volo che caratterizzano la missione dell'UAV studiato. In figura 1.9 viene riportato lo schema della missione.

Fase 0 Fase in cui si passa dal punto di decollo alla situazione di hovering sopra esso. Questa è caratterizzata da un decollo verticale per raggiungere una quota di circa 5 metri.

Fase 1 Fase caratterizzata dallo spostamento dal punto sopra il decollo fino all'inizio del filare del vigneto dove inizierà la distribuzione del prodotto. Oltre a raggiungere il punto di inizio si dovrà assettare l'UAV per ottenere un'altezza idonea al filare che si tratta.

Fase 2 Fase di distribuzione del prodotto fitosanitario nel primo filare per una lunghezza ipotetica di 200 metri lineari. In questa fase l'UAV dovrà mantenere una distanza specifica dal filare in altezza passando esattamente sopra la linea media della pianta.

Fase 3 Fase in cui viene fatto ruotare di 180° l'UAV per posizionarsi all'inizio del filare che si vuole trattare successivamente al primo.

Fase 4 Seconda fase di distribuzione del prodotto, per un totale di massimo 500 metri lineari.

Fase 5 Fase in cui l'UAV dovrà tornare al punto di partenza per poter effettuare la ricarica della batteria e la sostituzione del serbatoio.

Va fatto presente che le Fasi 2, 3 e 4 possono essere ripetute in funzione della lunghezza dei filari. Per esempio, se i filari sono di lunghezza di 50 metri, avendo a disposizione prodotto fitosanitario per 500 metri lineari si dovrà distribuire prodotto per 10 filari.

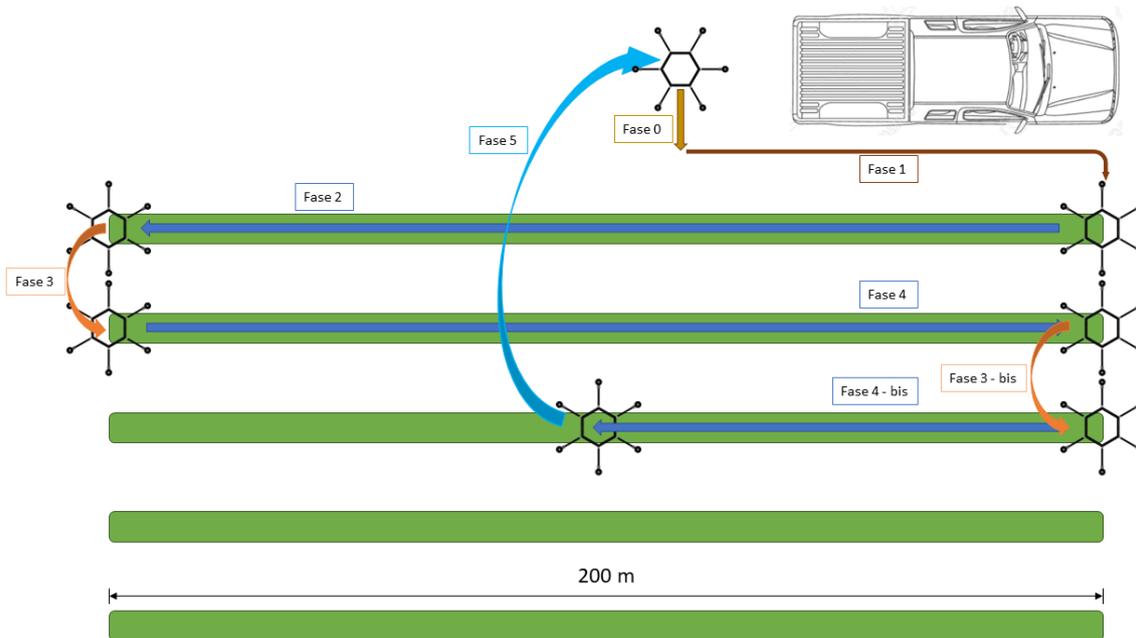


Figura 1.9: Profilo di missione

1.2 Analisi Statistica

Per poter avviare un solido processo di dimensionamento preliminare è necessario effettuare un'analisi di tipo statistico, basata su un determinato range di aeromobili a pilotaggio remoto, dal quale si andranno a ricavare i dati necessari al processo iterativo di design. Per i sistemi scelti sono state selezionate le caratteristiche essenziali; queste servono a trovare i valori del caso di studio.

È molto importante selezionare una categoria di velivoli analoga a quella del sistema che si andrà a progettare. Lo stato dell'arte dei droni utilizzati nel settore vitivinicolo è ampio e quindi costituito da diversi modelli costruttivi, la tendenza sempre più netta è quella di utilizzare i multicotteri. Questi ultimi sono sistemi aeromobili a pilotaggio remoto con un numero superiore a due motori elettrici e una batteria a capacità variabile in funzione della missione. Il multicottero permette di soddisfare utilizzi con necessità di grandi potenze e dimensioni ma anche con dimensioni compatte e piccole potenze.

1.2.1 Stato dell'arte multicotteri

Gli UAV di uso agricolo sono più grandi rispetto ai modelli comunemente utilizzati per uso domestico, di sorveglianza e fotografico. Questo perché trasportano piccoli carichi (nell'ordine dell'unità di kg), il drone per uso agricolo invece necessita generalmente di trasportare più carico possibile e quindi di una struttura notevole.

La necessità di trovare una soluzione per specifici utilizzi in vigneto sta portando a uno sviluppo massiccio di soluzioni. A seguire sono riportati i modelli attualmente presenti in commercio della gamma DJI, azienda produttrice di rilievo nel settore[3].

DJI AGRAS T30

Con un carico massimo di 40 kg, DJI Agras T30 è un innovativo drone a 6 rotori. Un corpo rivoluzionario consente una spruzzatura eccezionale, in particolare per gli alberi da frutta. Grazie all'uso delle soluzioni agricole digitali DJI, T30 contribuisce a ridurre il consumo di fertilizzanti e a incrementare la produzione in modo efficiente e basato sui dati statistici. Il modello è in fase di definizione finale, non ancora in vendita. Il drone è rappresentato in figura 1.10.



Figura 1.10: DJI Agras T30 [3]

DJI AGRAS T20

Grazie alle sue potenti prestazioni e alle eccezionali capacità di irrorazione, il T20 può condurre operazioni autonome su una varietà di terreni, come coltivazioni agricole, terrazze e frutteti. Il T20 è un drone a 6 rotori con un carico utile trasportabile di 20 kg. Il drone è rappresentato in figura 1.11.



Figura 1.11: DJI Agras T20 [3]

DJI AGRAS T16

Agras T16 presenta una struttura complessivamente diversa: il design modulare è in grado di supportare carichi più pesanti, semplifica l'assemblaggio e velocizza gli interventi di regolare manutenzione. Il T16 è un drone a 6 rotori con un carico utile trasportabile di 16 kg. Il drone è rappresentato in figura 1.12.



Figura 1.12: DJI Agras T16 [3]

DJI AGRAS T10

DJI Agras T10 offre una soluzione aerea altamente compatta e al contempo potente per siti agricoli di tutte le dimensioni ed esigenze. La sua struttura reticolare richiudibile è resistente e affidabile, consentendo efficienza di apertura e chiusura, comodità nel trasporto e facilità nelle transizioni. Il T10 è un drone a 4 rotori con un carico utile trasportabile di 8 kg. Il drone è rappresentato in figura 1.13.



Figura 1.13: DJI Agras T10 [3]

DJI AGRAS MG-1

L'MG-1 è un drone a otto rotori resistente alla polvere, all'acqua e alla corrosione, quindi, lavabile senza problemi e perfettamente resistente all'ambiente agricolo; esso può trasportare un carico utile fino a 10 kg. Questo macchinario ha la capacità di poter trattare da 2,8 a 4 ettari di piantagione ogni ora, con un'efficienza anche quaranta volte superiore a quella di irrorazioni condotte manualmente. Un serbatoio per il trasporto di sostanze chimiche è collocato sotto il corpo del drone; la miscela fitoiatrica viene irrorata da quattro ugelli direzionati verso il basso tramite un sistema di spruzzatura a pressione. Il drone è riportato in figura 1.14.

1.2.2 Stima dei valori per interpolazione

Si riportano in tabella A.1 i dati essenziali presi dalla pagina ufficiale della DJI[3], nel capitolo A si riportano tutti i dati dei droni presi come riferimento.

Tutti i grafici e le rette di interpolazioni seguenti sono stati calcolati con il codice MATLAB scritto con nome *Analisi statistica*, in particolare si veda il dettaglio nella sezione B.1.



Figura 1.14: DJI Agras MG-1 [3]

Macchina	Agras T30	Agras T20	Agras T16	Agras T10	Agras MG-1
Volume serbatoio pieno [l]	30	20	16	8	10
Peso totale (senza batterie) [g]	26400	21100	18500	13000	9700
Peso motori [g]	4536	3696	3696	2108	2240
Peso batteria [g]	10100	6400	6500	3800	4500
Peso massimo al decollo [g]	76500	47500	42000	26000	24800
Larghezza massima [mm]	2858	2509	2509	1958	1460
Altezza [mm]	790	732	732	553	578
Trazione massima totale [g]	112200	81000	81000	44800	40800
Potenza Massima totale [W]	21600	14400	14400	8000	6160
Capacità batteria [mAh]	29000	18000	17500	9500	12000

Tabella 1.1: Tabella dei dati utili all'analisi statistica

Massa Massima al decollo - MTOM

Partendo dalle specifiche di progetto, si valuta il MTOM in funzione del nostro requisito principale: la massa del serbatoio pari a $25l$. Interpolando i dati si è ottenuto il grafico in figura 1.15.

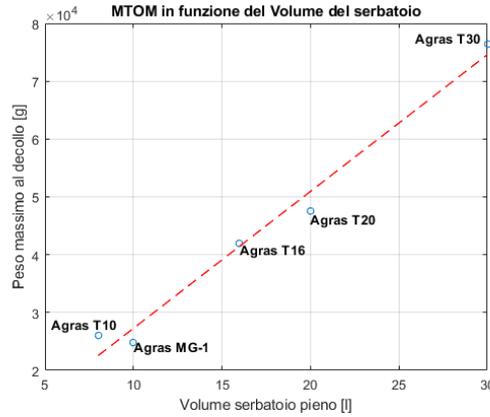


Figura 1.15: MTOM in funzione del Volume del serbatoio

La retta di regressione del MTOM in funzione del volume del serbatoio è $y = 3603.6269 + 2366.4508x$ e quindi si ottiene un valore di MTOM pari a $62.7kg$.

Trazione Massima e capacità della batteria

Per queste due stime si fa riferimento alla MTOM calcolata al passo precedente. Questo perché i dati in funzione della MTOM rispecchiano meglio l'andamento rispetto al volume del serbatoio.

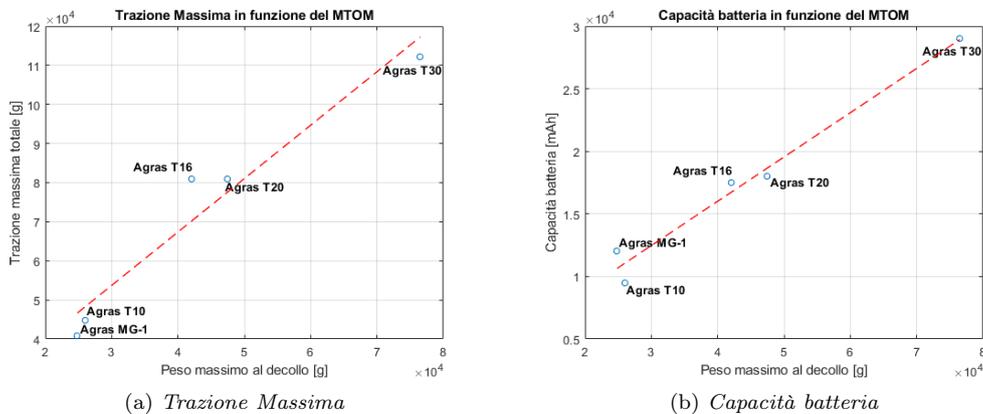


Figura 1.16: Trazione massima e capacità della batteria in funzione del MTOM

La retta di regressione della Trazione Massima in funzione del MTOM è $y = 12727.084 + 1.3661x$ e quindi si ottiene un valore di trazione massima pari a $98.5kg$.

La retta di regressione della Capacità della batteria in funzione del MTOM è $y = 1850.4264 + 0.354x$ e quindi si ottiene un valore di capacità pari a $24069mAh$ con una tensione della batteria di $51.8V$.

Peso totale (senza batterie)

Per questa stima si fa riferimento alla MTOM calcolata al passo precedente. Questo perché i dati in funzione della MTOM rispecchiano meglio l'andamento rispetto al volume del serbatoio.

La retta di regressione del peso totale senza batterie in funzione del MTOM è $y = 4671.7369 + 0.30139x$ e quindi si ottiene un valore pari a $23.58kg$.

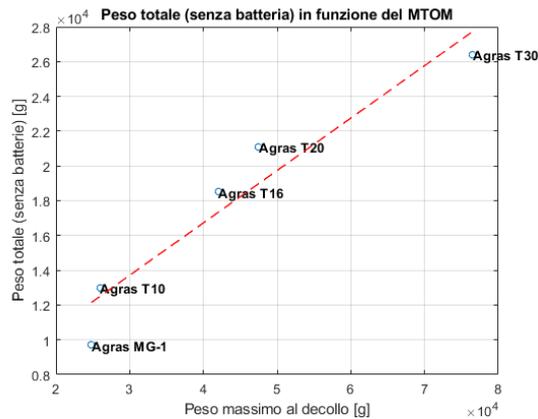


Figura 1.17: Peso totale senza batterie in funzione del MTOM

1.3 Normative attuali

In questa fase di progetto non è difficile identificare il contesto normativo entro cui muoversi offerto dalla legislazione italiana, con i vantaggi e svantaggi che seguono. Va fatto presente che la normativa riguardante questo settore è in continua evoluzione avendo uno sviluppo esponenziale in questi anni, sia per la regolamentazione della progettazione che per l'uso in ambiente professionale.

Sulla terminologia quotidiana con la parola 'drone' spesso viene fatta confusione. Il termine 'drone' può essere usato per un sistema a pilotaggio remoto dell'aviazione civile, spesso usato in contesto militare o nel gergo comune per un multirobot costruito a scopi ricreativi. Per gli anglofoni il termine UAV (Unmanned Aerial Vehicle) intende un veicolo aereo che non è pilotato da un essere umano a bordo del mezzo stesso e per UAS (Unmanned Aerial or Aircraft System) usato volendo includere non solo il velivolo ma tutto il sistema che consente il volo. Il modo più formale adottato dalle agenzie per l'aviazione nazionali e dall'International Civil Aviation Organization è RPAS (Remotely Piloted Aircraft System).

In Italia si sono adottati i termini APR (Aeromobile a Pilotaggio Remoto) e SAPR (Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto) – presi dal regolamento ENAC Edizione 3 del 11 novembre 2019 Emendamento 1 del 14/07/2020 [13]. L'SAPR è il sistema che viene utilizzato da un pilota in remoto, senza persone a bordo con fini diversi da quelli ricreativi e sportivi. Il termine SAPR sta sostituendo APR visto che il primo comprende anche la stazione di pilotaggio e di controllo di terra, da quale si monitora l'operazione in tempo reale ricevendo i dati sulla telemetria.

Questi mezzi occupano lo spazio aereo e potendo interferire con aeromobili per il trasporto di persone il tema della sicurezza è cruciale, l'esigenza da parte delle autorità è quella di regolamentare le operazioni. Essendo una tecnologia nuova è complesso inquadrare tutte le problematiche, EASA a livello europeo si sta occupando di questo lavorando soprattutto sullo snellimento del regolamento per agevolare gli studi, la ricerca e lo sviluppo di nuovi sistemi autonomi.

In Italia ad occuparsi della legislazione è l'ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile). Prendendo in considerazione la normativa italiana che interessa il prodotto studiato in questa tesi, esso viene definito appunto come APR - Aeromobile a Pilotaggio Remoto: "mezzo aereo a pilotaggio remoto senza persone a bordo, non utilizzato per fini ricreativi e sportivi". Va anche ricordato che "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, da regolamenti dell'ENAC" [13].

Un altro tassello importante a livello normativo è la distinzione tra guida autonoma e guida pilotata. Per guida autonoma si intende un APR con al suo interno un sistema di controllo che svolge dunque una missione disegnata e caricata all'interno del computer di bordo, in una condizione di guida autonoma: il drone riconosce i punti della traiettoria da seguire e l'attività che deve portare a termine. La guida pilotata è invece quando il pilotaggio viene effettuato da una persona remota per mezzo di un sistema di trasmissione/ricevitore con l'ausilio di un controllore elettronico di volo interno all'UAV, e di una stazione di controllo. Si presuppone cioè l'utilizzo di

un sistema di trasmissione dei comandi che vengono imposti direttamente dal pilota, il computer di bordo funge solo da autopilota stabilizzando il drone ed assistendo il pilota nella guida.

Nel Regolamento ENAC la prima distinzione che si fa è fra aeromodelli e SAPR: i primi sono mezzi impiegati esclusivamente per scopi ricreazionali e sportivi, questi non vengono considerati aeromobili, i SAPR invece sono mezzi impiegati o destinati all'impiego in operazioni specializzate (lavoro aereo), in ricerche ed uso scientifico in genere. Con operazioni specializzate si intendono le attività che prevedono l'effettuazione di un servizio a titolo oneroso o meno, quale ad esempio: riprese cinematografiche, televisive e servizi fotografici, sorveglianza del territorio o di impianti, monitoraggio ambientale, impieghi agricoli, fotogrammetria, pubblicità, addestramento.

Come visto prima una distinzione da fare è sulla base delle caratteristiche delle operazioni che si intendono effettuare, esse si distinguono in:

- VLOS (Visual Line of Sight): operazioni condotte con il pilota in grado di mantenere il diretto e continuativo contatto visivo con il mezzo aereo. Queste sono operazioni che avvengono nelle ore di luce entro una certa distanza sia verticale che orizzontale. I limiti sono di 150 m sul verticale e di 500 m di raggio sull'orizzontale;
- EVLOS (Extended Visual Line Of Sight): operazioni che avvengono sempre in ore di luce ma che superano i limiti delle condizioni VLOS. In questo caso è necessario integrare alla guida del pilota anche osservatori addizionali e stazioni di pilotaggio supplementari;
- BVLOS (Beyond Visual Line Of Sight): operazioni in cui il pilota non ha contatto visivo diretto. I sistemi che intendono operare in BVLOS necessitano di sistemi e procedure che mantengano separazione ed evitino le collisioni.

Dopo questa distinzione si aggiunge una suddivisione che avviene sulla base della massa operativa al decollo: per masse comprese fra 25 kg e 150 kg per la conduzione del mezzo è necessaria una licenza di pilota. Se la massa è compresa fra 2 kg e 25 kg, è necessario invece un attestato di pilota di APR. Ai fini dell'ottenimento dell'Attestato di pilota di APR si distinguono delle classi di peso:

- VL (Very Light): $0.3kg < MTOW < 4kg$;
- L (Light): $4kg < MTOW < 25kg$;
- H (Heavy): $MTOW > 25kg$ Solo con licenza da Pilota;

All'interno dell'Attestato si possono ottenere delle abilitazioni in termini di categorie: Ala portante/Aeroplano (Ap), Elicottero (Ec), Multicottero (Mc) e Dirigibile/Aerostato (As). Ad esempio, un pilota potrebbe essere abilitato per L/Mc, cioè per condurre un multicottero con massa inferiore a 25 kg di peso.

Le operazioni professionali specializzate sono divise in "non critiche" e "critiche". Le operazioni di un APR con massa minore o uguale a 2 kg con caratteristiche costruttive di inoffensività e frangibilità sono sempre considerate non critiche. Per operazioni specializzate "non critiche" si intendono quelle operazioni condotte in VLOS che non prevedono il sorvolo, anche in caso di avarie e malfunzionamenti, di:

- Aree Congestionate, assembramenti di persone, agglomerati urbani;
- Infrastrutture sensibili.

Prima di iniziare operazioni classificate come "non critiche", l'operatore deve presentare all'ENAC la dichiarazione che attesti la rispondenza al Regolamento e indichi le condizioni e i limiti applicabili alle operazioni di volo previste, inclusa, eventualmente, la necessità di operare in spazi aerei segregati. La dichiarazione è resa dall'operatore utilizzando esclusivamente l'accesso al sito web dell'Ente (www.enac.gov.it) fornendo le informazioni e i dati previsti nella procedura inclusi i dati della targhetta identificativa del SAPR. L'operatore è responsabile di valutare il rischio associato alle operazioni ed il permanere delle condizioni che fanno ritenere non critiche le operazioni.

Le operazioni “critiche” sono invece più delicate poiché è necessario assicurare un livello di sicurezza proporzionale al rischio dell’operazione. Per effettuare delle operazioni critiche è necessario che il drone sia dotato di appositi sistemi, ma per il velivolo che si sta progettando si prevede di non dover volare in condizioni ritenute da regolamento come "critiche".

Capitolo 2

PROGETTO CONCETTUALE

Partendo dalla base dati trovata al capitolo 1 si individuano le entità che costituiscono il sistema e le relazioni presenti tra loro. É uno step utile a capire la configurazione effettiva prima di iniziare la progettazione dettagliata. Si fa presente che in questa sezione verranno considerate varie idee e soluzioni.

2.1 Configurazione del velivolo

Nel capitolo 1 si è effettuata una ricerca riguardo allo stato dell'arte dei droni utilizzati nel mondo agricolo. In questa fase l'obiettivo è trovare la configurazione che rispecchi al meglio i requisiti e quindi si farà una nuova ricerca per identificare le varie configurazioni possibili.

La situazione ideale per trovare la configurazione migliore è quella di elaborare, partendo da una ricerca più ampia possibile, un'analisi multicriterio in funzione dei requisiti specifici richiesti. In questo elaborato si è utilizzata una configurazione standard, poiché un'analisi multicriterio sarebbe stata molto dispendiosa e non di interesse primario nello studio.

2.1.1 Configurazioni UAV in commercio

UAV sta ad indicare 'Unmanned Aerial Vehicles', questi sono stati particolarmente studiati e oggetto di continuo interesse negli ultimi decenni, prima analizzati per scopi militari poi per l'ambito civile e commerciale. In questa tesi si definisce UAV come segue: "Un aeromobile privo di un operatore umano in grado di operare autonomamente, semi-autonomamente o pilotato da remoto". Sicuramente tra i vantaggi ci sono:

- La possibilità di operare in ambienti difficili come: altitudini elevate, condizioni di meteo sfavorevoli, pendenze sostenute, ecc. Questo vale sia per il campo militare che per quello scientifico.
- Capacità di svolgere missioni di lunga durata, monotone e ripetitive. La stessa missione svolta da un umano potrebbe essere irrealizzabile o alienante.
- Aumento di sicurezza dovuto all'assenza dell'uomo a bordo.

Gli UAV si possono dividere in tre principali categorie: velivoli a lungo raggio e quota, velivoli ad ala fissa e velivoli ad ala rotante. Il primo caso non viene qui preso in considerazione per impossibilità di utilizzo.

Gli UAV ad ala fissa funzionano in modo analogo agli aerei leggeri senza pilota. Gli UAV ad ala rotante si possono distinguere in ulteriori due sottocategorie a seconda del numero di rotori: elicottero o multicottero. Questi velivoli devono la loro portanza alle eliche, che generano spinta attraverso la loro rotazione sull'albero del rotore. Tuttavia, mentre gli elicotteri contengono tipicamente un singolo rotore con due pale, la maggior parte degli UAV sono multicotteri.

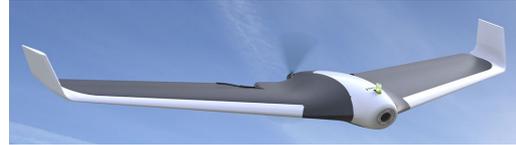
Gli UAV ad ala rotante sono indicati come veicoli a decollo e atterraggio verticale (VTOL), mentre gli UAV ad ala fissa sono classificati come veicoli a decollo e atterraggio orizzontale (HTOL). I veicoli VTOL sono i più comuni perché possono volare in ambienti chiusi e non richiedono una pista come alcuni veicoli HTOL. D'altra parte, i veicoli HTOL richiedono generalmente meno potenza e tendono ad avere maggiori efficienze e quindi tempi di volo superiori rispetto ai veicoli VTOL. Uno dei motivi principali per il predominio degli UAV ad ala rotante è la loro capacità di produrre portanza da fermi, mentre gli UAV ad ala fissa richiedono uno spostamento per generare portanza tramite il teorema di Kutta-Joukowski. Ciò rende gli UAV ad ala rotante più manovrabili e il movimento è generalmente più controllato. Alcuni esempi di UAV ad ala fissa e rotante sono mostrati nelle figure 2.1 e 2.2.

UAV ad ala rotante

Tra le configurazioni possibili dell'ala rotante si trovano sia sistemi multirotores che elicotteri. Innanzitutto, si espone una panoramica del primo tipo: il quadricottero. Il quadricottero è un dispositivo volante senza equipaggio composto da almeno quattro motori sul suo corpo. Esistono diverse configurazioni in funzione del numero di rotori e questi modelli sono anche noti come multi-rotori. Anni fa, pilotare questo tipo di veicolo era piuttosto difficile; tuttavia, i progressi tecnologici hanno aiutato i modelli recenti ad avere una maggiore stabilità e un facile controllo. L'elettronica che viene installata all'interno del dispositivo richiede una programmazione di alto livello e grazie a questa il sistema può fornire comandi facili ed automatici. Oggigiorno è possibile ottenere quadricotteri a un prezzo ragionevole, grazie alla miniaturizzazione dell'elettronica e alla disponibilità complessiva delle parti e dei componenti.



(a) *eBee Plus*



(b) *Parrot Disco*



(c) *Talisman Aircav*



(d) *Skywalker 1900*

Figura 2.1: Esempi di UAV al ala fissa



(a) *ARDUcopter*



(b) *FlyNotex*



(c) *Phantom 4 DJI*



(d) *T-Rex 700e*

Figura 2.2: Esempi di UAV al ala rotante

Proprio come un quadricottero, un elicottero è un altro tipo di veicolo volante senza equipaggio. I quadricotteri hanno quattro motori mentre un elicottero ha un solo motore e un piccolo rotore di coda. Con questo design ingegneristico, sono molto più difficili da pilotare e quindi richiedono mediamente abilità di volo superiori. Dal punto di vista ingegneristico, i quadricotteri radiocomandati (RC) ricevono molta più assistenza elettronica. Per questo motivo, possono rimanere stabili in aria senza problemi, a differenza di un elicottero. Gli elicotteri RC pur richiedendo una maggiore abilità di volo hanno una curva di apprendimento più elevata, la tecnologia di oggi ha aiutato gli elicotteri in volo a essere un po' più fluidi rispetto ad anni fa.

Il controllo dell'elicottero viene effettuato attraverso il passo collettivo e ciclico, i quali vanno a modificare il passo delle pale e ciò permette di raggiungere lo spostamento desiderato. Il controllo collettivo modifica la portanza delle pale per uno spostamento verticale, mentre il passo ciclico permette di controllare l'elicottero intorno all'asse di beccheggio e di imbardata. Nel sistema a piatto oscillante i due sistemi di controllo sono miscelati e avviene il trasferimento desiderato del profilo aerodinamico: sollevamento, abbassamento o inclinazione del piatto oscillante tramite i leverismi sul rotore. Per un quadricottero invece si utilizzano pale a "passo fisso" e quindi l'angolo di attacco non varia durante la rotazione: a permettere lo spostamento è il controllo sul numero di giri dei vari motori installati. Un'ulteriore semplificazione tecnica e strutturale del quadrirotore è l'assenza del rotore di coda, le cui pale girano sul piano verticale per bilanciare la rotazione orizzontale di quelle del rotore principale. Il rotore di coda è un'anticoppia che si oppone alla coppia del rotore principale, questa determinerebbe una rotazione della fusoliera in senso opposto alla rotazione del rotore (legge di conservazione del momento angolare). Un ulteriore vantaggio di un quadrirotore rispetto ad un elicottero è il minore diametro dei singoli rotori rispetto a quello necessario per un elicottero convenzionale, che consente di immagazzinare minore energia cinetica: questo rende più sicuro un quadrirotore, sia in caso di incidente, sia in caso in cui le dimensioni del sistema siano limitate da requisiti.

Un vantaggio notevole del multicottero, in particolare per il quadricottero, è la simmetria del design. Questa caratteristica permette di centrare il payload agevolando il sistema di controllo nell'eventualità che questi carichi cambino durante lo stesso profilo di missione. Inoltre, ogni rotore contribuisce al raggiungimento della portanza richiesta, fornendo una quantità di spinta maggiore rispetto ad un elicottero convenzionale e consente di portare payload e piattaforme computazionali più pesanti. A fronte di questi vantaggi c'è l'handicap di avere una bassa velocità di crociera.

Le configurazioni più comuni per gli UAV ad ala rotante sono quadrirotore ed esacottero. Gli UAV ad ala rotante hanno un'elevata manovrabilità e possono fungere da piattaforma galleggiante fissa da cui è possibile ottenere immagini o misurazioni di sensori molto precise. Gli UAV ad ala fissa, come è già stato detto, richiedono meno energia per produrre portanza e quindi tendono ad avere lunghi tempi di volo e questo permette loro di raggiungere distanze notevoli. Altri UAV meno comuni includono i modelli ibridi o modelli ad ala battente.

Gli UAV ibridi utilizzano una combinazione di ali fisse e rotanti per generare portanza, questa possibilità offre una notevole adattabilità. Tuttavia, il sistema complessivo tende a essere meno affidabile rispetto alle configurazioni ad ala fissa o ad ala rotante e qualsiasi riparazione o manutenzione necessaria, può essere più complessa. Sono anche in genere più pesanti a causa del maggior numero di componenti richiesti.

Gli UAV ad ala battente sono progettati per imitare la meccanica del volo di uccelli e insetti e quindi tendono ad essere piccoli. Un carico utile (se presente) di sensore o telecamera è in genere direttamente incorporato nel design. Rispetto ad altri tipi di UAV è ridotta la flessibilità delle applicazioni e la stabilità del volo è più vulnerabile ai venti trasversali e alla turbolenza [26].

2.1.2 Configurazione scelta: UAV ad ala rotante

La configurazione ad ala rotante è stata scelta in funzione dei requisiti del progetto. È necessario un sistema che abbia un'elevata efficienza a causa degli elevati pesi da trasportare e quindi sarebbe più idonea una configurazione ad ala fissa, ma vista la bassa velocità di utilizzo, questa configurazione non è possibile. Si ricorda che la velocità di avanzamento del sistema nel filare è di qualche metro al secondo, il che non permette al sistema di creare una portanza sufficiente.

Tra la configurazione multirotore o elicottero si sceglie la prima. I motivi sono legati ai seguenti punti:

- **Facilità di guida:** i multirotori hanno il grande vantaggio di essere più facili da pilotare. Caratteristica non trascurabile considerata l'eventualità di far pilotare il sistema da uno specialista del settore vitivinicolo, piuttosto che da uno del settore aeronautico;
- **Conoscenza:** nel campo degli UAV le varie ricerche sono principalmente focalizzate sui multicotteri, questo porta a una maggiore conoscenza della configurazione, utile nelle fasi successive di progetto;
- **Costo:** la complessità meccanica dell'elicottero è più elevata rispetto a un multicottero, comportando costi maggiori;
- **Motori elettrici:** il peso del sistema che si sta studiando varia da 70 a 90 kg, non ci sono in commercio motori per elicotteri che supportino tale carico. Progettando un multicottero, invece, sarà possibile suddividere il carico su un numero sufficiente di rotori.

Numero di motori e posizionamento rispetto al baricentro

Di seguito si analizzano le configurazioni possibili del multicottero, queste sono definite in funzione del numero di rotori e del posizionamento degli stessi, rispetto all'unità centrale dell'UAV. In funzione del numero di rotori si parla di tricoteri, quadricoteri, esacoteri e ottocoteri che utilizzano rispettivamente un totale di tre, quattro, sei e otto rotori. Rispetto al posizionamento è possibile avere configurazioni a I- o a X-. La figura 2.3 mostra le 8 configurazioni più comuni [26].

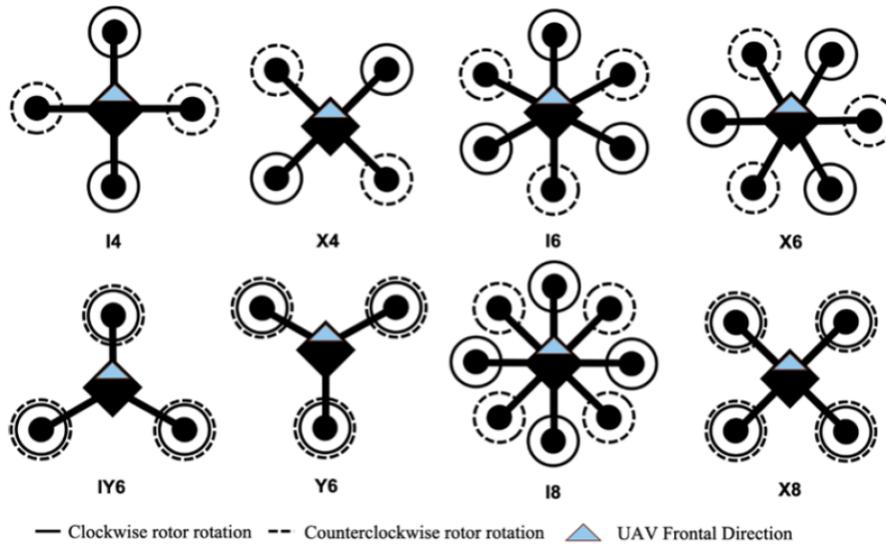


Figura 2.3: Configurazioni multicottero

Tra le tipologie di layout dei multicotteri, i quadricoteri sono stati scelti da molti ricercatori come velivoli molto promettenti sia per uso indoor che outdoor. La progettazione di multicotteri con più di quattro rotori, sta aumentando grazie ai vantaggi che presentano. Tra i più importanti: la possibilità di gestire uno o più guasti al motore senza conseguenze gravi; l'aumento del carico utile totale; il miglioramento delle manovre e un livello di stabilità superiore. Il numero aggiuntivo di rotori, tuttavia, causa alcune complicazioni rispetto al classico quadricottero [27].

Per questo sistema viene scelto di progettare un esacottero i cui sei rotori sono situati sui vertici di un esagono e sono equidistanti dal centro di gravità. Questa scelta è stata fatta con l'obiettivo di andare incontro a un sistema più sicuro e con la disponibilità di una letteratura ricca di informazioni su cui basarsi per gli studi successivi.

Tra la configurazione a I6 e X6 si opta per la seconda. Poiché il sistema di distribuzione sarà disposto al centro dell'UAV questa configurazione limiterà il disturbo creato dalle eliche principali.

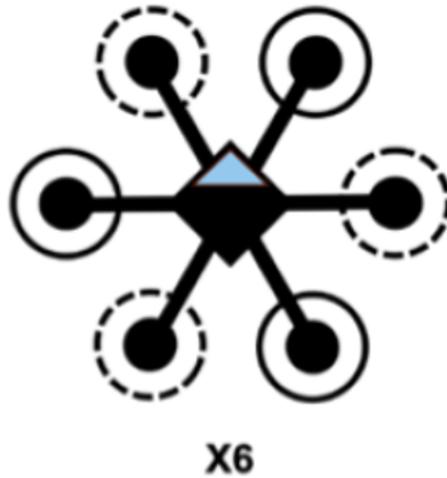


Figura 2.4: Configurazione scelta

2.2 Macro sistemi dell'UAV

Nelle successive sottosezioni si analizzano i sistemi dell'UAV. Questo serve ad avere una stima del peso attraverso un'analisi per iterazione che viene esposta al capitolo 2.3.

2.2.1 Batteria

Le batterie sono un elemento fondamentale del sistema in analisi in quanto devono fornire potenza ai motori. L'impiego delle batterie come fonte energetica di un velivolo è un fattore limitante a causa della loro densità energetica. La scelta delle batterie è stata fatta sulla base di un'analisi delle principali tecnologie esistenti e/o in fase di sviluppo:

- Batterie agli Ioni di Litio: presentano una elevata densità energetica, ingombro e peso ridotti, una maggiore durata e costi di manutenzione minori; inoltre, non presentano l'effetto memoria anche se sono infiammabili e sensibili alle alte temperature;
- Batterie Litio – Zolfo: batterie con elevata densità energetica e bassi costi, ma caratterizzate dall'effetto Shuttle, ovvero degradazione e breve durata
- Batterie Litio – Aria: sono più leggere ed economiche delle batterie agli ioni di litio e anch'esse presentano una elevata densità energetica, ma hanno un decadimento rapido delle prestazioni accompagnato dalle difficoltà di realizzare l'alimentazione con O_2 ;
- Batterie Zinco – Aria: presentano una maggior sicurezza e durata ad alte temperature, ma subiscono un peggioramento delle prestazioni con le basse temperature e con l'umidità;

Chimica	Densità Energetica
<i>Li – Ion</i>	100 – 280 Wh/kg
<i>Li – S</i>	500 - 1250 Wh/kg
<i>Li – O₂</i>	500 - 1250 Wh/kg
<i>Zn – O₂</i>	500 - 1250 Wh/kg

Tabella 2.1: Densità energetiche

Nella tabella 2.1 sono riportate delle stime di densità energetica delle diverse tipologie di batterie analizzate. Nonostante le batterie a Ioni di Litio presentino una densità energetica inferiore rispetto alle altre tecnologie proposte, si ritiene che esse rappresentino la soluzione più adatta per ragioni

di affidabilità e sicurezza, essendo già ampiamente utilizzate su questo tipo di velivoli. Le batterie Li - S e Li - O₂ risultano essere ancora lontane da una possibile applicazione, mentre le Zn - O₂ trovano un maggiore impiego in campo automotive[10].

Quando si tratta di velivoli di piccola taglia o UAV le batterie ai polimeri di litio (LiPo) attualmente sono le più utilizzate, sia grazie all'elevata densità di energia come visto precedentemente, sia grazie alle elevate capacità di scarica di corrente: $5 < C - Rate < 12$. La tensione di queste celle dipende dallo stato di carica ed è pari a: 4.2V al 100%, 3.85V al 50% e 3.7V al 20%. Va fatto presente che scaricare la cella LiPo sotto i 3V può portare a danni permanenti: si consiglia pertanto di caricarla, una volta arrivati a quella soglia, avendo una profondità di scarica (DoD - Depth Of Discharge) pari all'80%. Le celle si possono collegare in serie (S) o in parallelo (P), per esempio se si ha una batteria 4S1P questa è costituita da 4 celle con un voltaggio nominale di 14.8V. Oltre a questo, le celle sono caratterizzate da una capacità in mAh e dal C-Rate che specifica la massima corrente che può essere assorbita in modo continuo, per esempio $35C * 5.2Ah = 182A$. È evidente che la massima scarica di corrente non dipende dalla capacità della batteria.

Un tipico sistema di batterie è costituito da cinque sottosistemi:

- Batterie di celle: immagazzinano l'elettricità;
- Struttura in cui alloggiato le celle: proteggono le celle e altri componenti da vibrazioni durante il volo;
- Sistema di raffreddamento: mantiene la temperatura del pacco batteria entro i limiti specificati;
- Sistema di gestione delle batterie (BMS): gestisce tutte le celle all'interno di un pacco batteria e le protegge dal funzionamento al di fuori dei limiti specificati dal produttore;
- Cablaggio: collegamento elettrico di tutte le celle del pacco batteria.

Considerata l'analisi di questi sistemi annessi alle celle, una densità energetica di $200Wh/kg$ rappresenta un valore ottimistico. In seguito, si utilizzerà questo valore per effettuare il dimensionamento della batteria.

2.2.2 Catena di propulsione

Nella maggior parte dei multirotori vengono utilizzati motori senza spazzole (brushless - BLDC) e non motori con spazzole (brushed - DC). Il principio di base delle due tipologie è lo stesso: una volta che gli avvolgimenti del motore vengono alimentati si crea un campo magnetico temporaneo che respinge o attira i magneti permanenti. Questa forza viene convertita in momento creando una rotazione dell'albero in cui la corrente viene switchata in altri gruppi di avvolgimenti, mantenendo la repulsione/attrazione ottima per continuare a girare. Le differenze di costruzione sono legate al modo in cui viene fornita la corrente ai diversi avvolgimenti.

Nel motore a spazzole, figura 2.5, la corrente agli avvolgimenti del motore avviene grazie alle spazzole. Gli avvolgimenti e il commutatore sono collegati allo stesso albero sul rotore (parte rotante del motore) mentre i magneti permanenti sono sullo statore. I vantaggi di questo tipo di motore sono legati alla semplificazione del cablaggio e al basso costo.

Il motore senza spazzole, figura 2.6, è il più utilizzato nel settore del modellismo per il grosso vantaggio di essere preciso, silenzioso e con una manutenzione prossima allo zero. La commutazione dell'intensità di corrente viene effettuata attraverso un dispositivo elettronico di controllo (Electronic speed controllers - ESC). Gli avvolgimenti sono sullo statore e i magneti permanenti sul rotore. In questa tesi che presenta l'analisi di un sistema pesante, verranno pertanto analizzati solo motori senza spazzole.

La catena di propulsione del multirottore è costituita dall'elica, dal motore, dall'ESC e dalle batterie [11]. Questa catena di propulsione si presta facilmente a calcolare i valori in modo analitico come un sistema SISO (Single Input - Single Output). A seguire si analizzano gli elementi della catena di propulsione, si precisa che le batterie sono state trattate nella sezione 2.2.1.

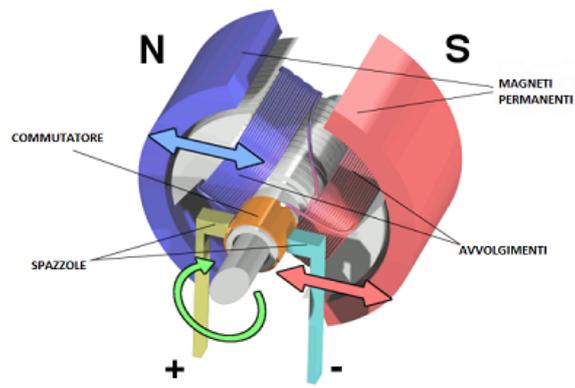


Figura 2.5: Motore Brushed

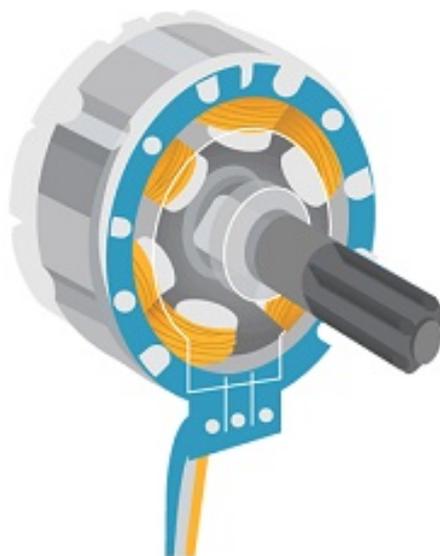


Figura 2.6: Motore Brushless

Eliche

Le eliche del multirottore sono caratterizzate da 3 principali parametri: diametro, passo e numero. In generale, più questi valori sono alti, maggiore è la coppia richiesta al motore, ottenendo una spinta superiore. È noto, tuttavia, che eliche a due pale lunghe con una rotazione lenta sono aerodinamicamente più efficienti di pale corte, numerose e veloci.

Le caratteristiche di spinta dell'elica per un multicottero sono in funzione della sua velocità di rotazione e della velocità di arrivo dell'aria. Tuttavia, se si considera aria statica (a velocità nulla) e costante la sua densità, si può affermare che la spinta, la coppia e la potenza dipendano solo dalla velocità dell'elica.

Motore

In un UAV l'obiettivo principale del motore è quello di far girare l'elica in modo affidabile e con un'elevata accelerazione in modo da raggiungere velocemente la velocità voluta. I principali limiti di un motore BLDC sono legati alla velocità e alla corrente, la corrente massima è spesso indicata dal costruttore e la velocità massima a vuoto può essere calcolata dal parametro KV moltiplicato per la tensione applicata:

$$\omega_0 = KW * V$$

Il funzionamento classico è a tensione costante, quando viene applicata la corrente il motore inizia a esercitare una coppia sull'albero accelerandolo fino a che questa non diventa uguale alla coppia di carico (assumendo nulle le perdite meccaniche). A basse velocità, ovvero lontano dai vincoli del motore, si assume che il rapporto tra coppia e corrente del motore sia costante ed espresso con la costante di coppia del motore (K_T). In questo modo la corrente applicata viene trasformata in coppia in funzione delle caratteristiche del motore e a sua volta trasformata in velocità in funzione della caratteristica coppia-velocità dell'elica.

Un parametro importante del motore ovviamente è la spinta che riesce a produrre, questo valore esplicita la capacità di sollevamento una volta che viene montato sull'UAV. Se la spinta dei motori montati sul sistema è inferiore al peso del sistema stesso non si ha una macchina volante, ma un oggetto che non riesce a sollevarsi da terra. Per questo motivo viene introdotto un parametro definito come Spinta-Peso, questo è semplicemente calcolato come il rapporto tra la spinta che il sistema riesce a produrre e il peso dello stesso. Questo parametro è relativamente costante in funzione delle applicazioni che si studiano, in tabella 2.2 vengono riportati dei valori tipici, essi si basano sul documento [5].

Spinta-Peso	Applicazione
2	Volo lento
3	Professionale fotografica
4	Sorveglianza
5+	Acrobazie e video ad alta velocità
7+	Gare

Tabella 2.2: Rapporto di Spinta-Peso di UAV

Electronic Speed Controller

Nella progettazione è importante dimensionare l'ESC in base alla corrente massima che fluisce al motore. In questa fase però il componente viene riportato con l'unico obiettivo di esplicitare il suo compito: trasferire la corrente dalla batteria al motore con tensione costante.

2.2.3 Sistemi propulsivi in commercio

In questa fase non si analizza la catena propulsiva, ma sarà necessario stimarne il peso.

Si analizzano in questa sezione i motori dell'azienda T-MOTOR [8], riportandone una vasta gamma. Quest'analisi dà la possibilità di trovare un sistema idoneo allo scopo. Per la ricerca

iniziale ci si basa sul fatto che indicativamente l'UAV abbia una massa di $62.7kg$ come calcolato al capitolo 1.2.2, sia un sistema a 6 motori e che il rapporto Spinta-Peso massimo sia pari a circa 2 per le caratteristiche esposte al capitolo 2.2.2.

Motore	U13II KV130	U13II KV65	U15II KV80	U15II KV100	U15L KV43
Larghezza [mm]	100	100	147.5	147.5	151.5
Altezza [mm]	60	60	64	64	86
Peso [g]	990	975	1740	1740	3600
Voltaggio [V]	48	100	50	50	100
Modello Elica	G32*11	G32*11	G40*13	G40*13	P47*18
Spinta a 75% [kg]	16.7	18.38	18.9	25.3	45.103
Potenza a 75% [W]	3139	3450	2810	4645	7672
Efficienza a 75%	5.32	5.33	6.73	5.45	5.88
Massima spinta [kg]	24.3	28.711	28.9	35.5	61.231
Potenza su max spinta [W]	5659	6727	5520	8550	12153
Efficienza su max spinta	4.29	4.27	5.24	4.15	5.04

Tabella 2.3: Tabella dei dati dei motori scelti

In tabella 2.3 si riportano motori che rispecchiano le proprietà cercate con le caratteristiche essenziali per questa fase progettuale.

Per iniziare l'analisi iterativa si sceglie il motore U15II KV80, modello con la miglior efficienza di spinta tra quelli scelti. Per l'elica si sceglie il modello G40*13 che ha un peso per singola elica pari a $237g$.

2.2.4 Sistema di distribuzione fitosanitario

Per questa stima è necessario avere un'idea di come sarà il sistema. Dopo aver analizzato i migliori metodi di distribuzione del prodotto fitosanitario nel capitolo 1.1.1 e avendo dei requisiti ben precisi in termini di perdite e deriva (esposti al capitolo 1.1.4) si studia un sistema che rispecchi queste necessità.

Il sistema che più si addice per questo è quello di un UAV con braccia che avvolgono la pianta, come il nebulizzatore a tunnel visto in figura 1.5. In figura 2.7 è riportato un modello CAD che mostra come si vuole progettare il sistema di distribuzione. Questo è un modello che ha il solo scopo di mostrare la disposizione delle parti all'interno dell'assieme: in arancione si modella il sistema di propulsione; in blu il contenitore del liquido di distribuzione, la batteria e i sistemi annessi; in verde i bracci tubolari che avvolgono il vitigno; in rosso l'ugello e il motore che distribuiscono il prodotto.

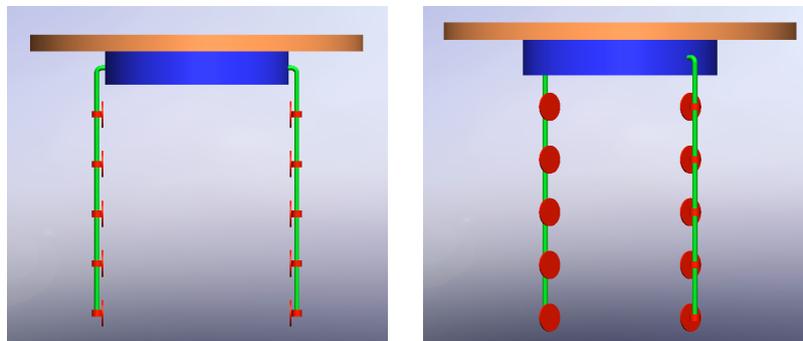


Figura 2.7: Vista modello del sistema di distribuzione dei fitosanitari

Prendendo come riferimento i sistemi attualmente montati sul drone più prestante della DJI, ovvero il modello Agras T30, si ha un peso del sistema irroratore di $3.9kg$. A questo però va aggiunta la modifica dei due bracci che avvolgono la pianta per migliorare il trattamento. Per

stimarne il peso si ipotizza di montare due braccia costruite con un tubolare di fibra di carbonio di diametro esterno di $30mm$ con spessore di $3mm$ e lunghe $1500mm$.

Essendo il peso specifico del carbonio pari a $1750kg/m^3$ è possibile avere una stima della massa di questa parte aggiuntiva. Il volume dei due tubi, avendo un'area a forma di corona circolare pari a $81\pi mm^2$ e una lunghezza di $1500mm$, è pari a $81\pi * 1500 = 121500\pi mm^3 = 0.0003817m^3$. Questo volume, moltiplicato al peso specifico del carbonio, porta a una massa dei tubi pari a $668g$. Oltre al peso del tubo dei bracci si può inizialmente pensare che il prodotto debba essere forzatamente spinto verso il filare, si rende pertanto necessaria l'aggiunta di dieci motori elettrici (5 per lato). Tenuto conto che è necessario installare un rotore che necessita di corrente e prodotto, si stima un'aggiunta di peso pari a $100g$.

La massa del sistema completo è data dalla somma del sistema dell'UAV agras T30, i due tubi di alluminio e i 10 motori. Si ha pertanto una stima del peso del sistema di distribuzione di $3900 + 668 + 1000 = 5568g \approx 5.6kg$.

2.2.5 Struttura e Sistemi annessi

Per questa stima si utilizza il valore trovato nell'analisi statistica della sezione 1.2.2. Questo è pari a $\approx 23.6kg$. È ora essenziale andare a sottrarre il peso dei sistemi che si sono calcolati a parte, e quindi dei motori, delle eliche e del sistema di distribuzione.

Se andassimo a togliere il valore di questi tre contributi calcolati precedentemente si otterrebbe una massa rimanente di $\approx 6kg$, ma questo valore non è corretto perché nell'analisi preliminare si fa riferimento a sistemi in cui la massa dei motori e del sistema di distribuzione sono più bassi.

Per stimare la massa della struttura si prende il valore della massa dell'AGRAS T30 ($26.4kg$), si sottrae la massa delle pale, dei motori ($5.10kg$) e del sistema di spruzzatura ($3.9kg$) ottenendo una massa della struttura e dei sistemi annessi pari a $\approx 17.4kg$.

2.3 Analisi Iterativa MTOM

Nella progettazione, oltre a pensare di avere un sistema efficiente, un altro obiettivo è quello di trovare il miglior compromesso tra peso caricato e batteria imbarcata, per avere la giusta autonomia del sistema.

Considerando le stime fatte precedentemente e la densità energetica della batteria pari a $200Wh/kg$, è possibile, attraverso un'analisi iterativa, effettuare il conteggio della massa di batteria da imbarcare. Questo calcolo sarà essenziale per iniziare la progettazione dettagliata, va precisato tuttavia che successivamente verrà migliorato con dati più puntuali.

Per gli aeroplani è possibile effettuare un calcolo iterativo per ricavare la MTOW su base statistica in funzione del numero di passeggeri o di altri parametri, questo viene fatto basandosi su un'elevata quantità di modelli in produzione. Per il velivolo che si sta progettando questo non è possibile, pertanto si farà in seguito un calcolo iterativo partendo dal dato di MTOM trovato al capitolo 1.2.2.

L'idea di base è quella esposta nel flowchart in figura 2.8. Essendo il consumo della batteria in rapporto alla massa dell'UAV e del rapporto spinta-peso, è necessario andare a ipotizzare i consumi in termini di energia ($[Wh]$) per ogni fase di volo. I risultati vengono riassunti nella tabella 2.4.

Fase 0 Fase caratterizzata da un decollo verticale per raggiungere una quota di circa 5 metri. Si ipotizza una durata di $10s$ con un rapporto spinta-peso pari a 2 e pieno carico fitoterapico;

Fase 1 Fase caratterizzata dallo spostamento dal punto sopra il decollo fino all'inizio del filare del vigneto dove inizierà la distribuzione del prodotto. Questa fase è la più difficile da stimare in termine di tempo essendo variabile in funzione della distanza dal punto di decollo all'inizio del filare. Si ipotizza una durata di $3min$ per effettuare una distanza di circa $900m$ a $5m/s$ a pieno carico con un rapporto spinta-peso pari a 1.75;

Fase 2 Fase di distribuzione del prodotto fitosanitario nel primo filare per una lunghezza ipotetica di 250 metri lineari. In questa fase l'UAV dovrà mantenere una distanza specifica dal filare in altezza passando esattamente sopra la linea media della pianta. Ipotizzando una velocità di $1m/s$ per svolgere il trattamento si avrà una durata di $250s$, si ipotizza di usare metà

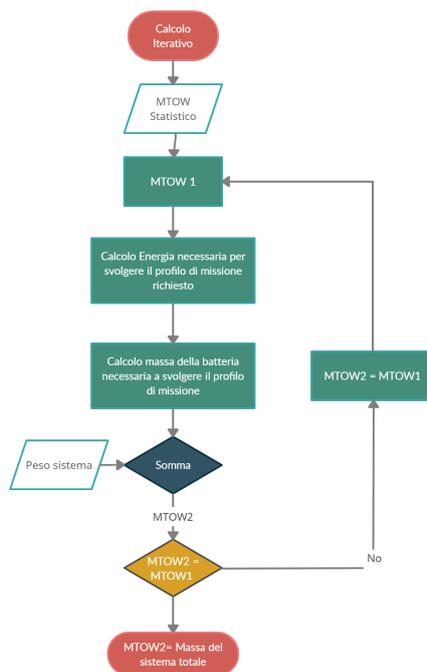


Figura 2.8: Schema di flusso calcolo iterativo

prodotto fitoterapico imbarcato e quindi per il calcolo del consumo si usa una media pari a $3/4$ del serbatoio pieno con un rapporto spinta-peso pari a 1.5. Si sceglie una velocità piuttosto bassa per aumentare l'efficacia del trattamento stesso, diminuendo le perdite di prodotto causate dalla deriva o cadute sul terreno;

- Fase 3** Fase in cui viene fatto ruotare l'UAV di 180° per posizionarsi all'inizio del filare che si vuole trattare successivamente al primo. Per questa fase si ipotizza una durata di 10s con un rapporto spinta-peso pari a 2 e con metà carico fitoterapico;
- Fase 4** Seconda fase di distribuzione del prodotto, come per la fase 2, ma con un carico pari a $1/4$ del pieno del serbatoio;
- Fase 5** Fase in cui l'UAV dovrà tornare al punto di partenza per poter effettuare la ricarica della batteria e la sostituzione del serbatoio. Come per la fase 1, ma con carico vuoto.

Fase	Rapporto spinta-peso	Durata [s]	Carico fitoterapico [l]
0	2	10	25
1	1.75	180	25
2	1.5	125	19
3	2	10	12.5
4	1.5	125	6.5
5	1.75	180	0

Tabella 2.4: Riassunto fasi di missione

Il processo di iterazione si effettua attraverso un codice MATLAB diviso in 3 parti. Nella prima parte avviene l'inserimento dei dati delle masse dei sistemi analizzati nelle sezioni precedenti e della potenza $[W]$ in funzione della spinta che il motore crea (valori presi dal sito del motore [8]). Nella seconda parte si calcola la regressione di primo grado e quella esponenziale dei punti che riportano i valori di potenza e trazione in funzione della manetta (vedi figura 2.9). La curva esponenziale approssima meglio l'andamento dei punti nel grafico e l'equazione è la seguente:

$$y = 18.3424 \cdot x^{1.448}$$

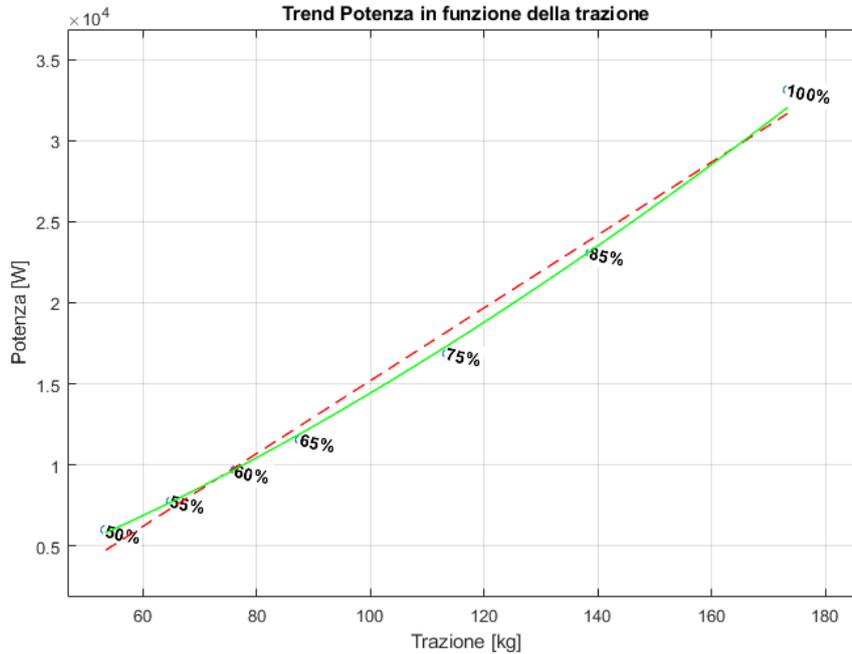


Figura 2.9: Andamento Potenza e trazione in funzione della manetta

Nella terza parte serve avere l'equazione per calcolare quanta potenza il motore richiede per poi moltiplicarla per il tempo e trovare l'energia necessaria al sistema. Per migliorare l'accuratezza della stima si aggiunge il consumo dei 10 motorini che saranno installati sulle braccia (vedi analisi della sezione 2.2.4). Il consumo è pari a $50W$ per motore e considerando un tempo di azionamento di $500s$ (fase 2 e 4) si stima un totale di energia è di $50W \cdot 500s \approx 7Wh$. In particolare il codice è chiamato *Progetto Concettuale* e riportato nella sezione B.2.

La massa della batteria ricavata è di $21kg$ e quella dell'intero sistema di $80kg$. In figura 2.10 è possibile osservare l'andamento dei valori trovati nei vari step di iterazione, mentre in tabella 2.5 sono riportati i valori ottenuti.

Numero Iterazione	Valore MTOW
1	62.70
2	73.52
3	77.77
4	79.55
5	80.30
6	80.62
7	80.76
8	80.82
9	80.84
10	80.86
11	80.86

Tabella 2.5: Valori MTOW trovati per iterazione

La massa che si ricava dal conto è superiore rispetto a quella stimata per analisi statistica, questo è causato da due motivi. Il primo è dovuto all'installazione di motori più potenti e quindi

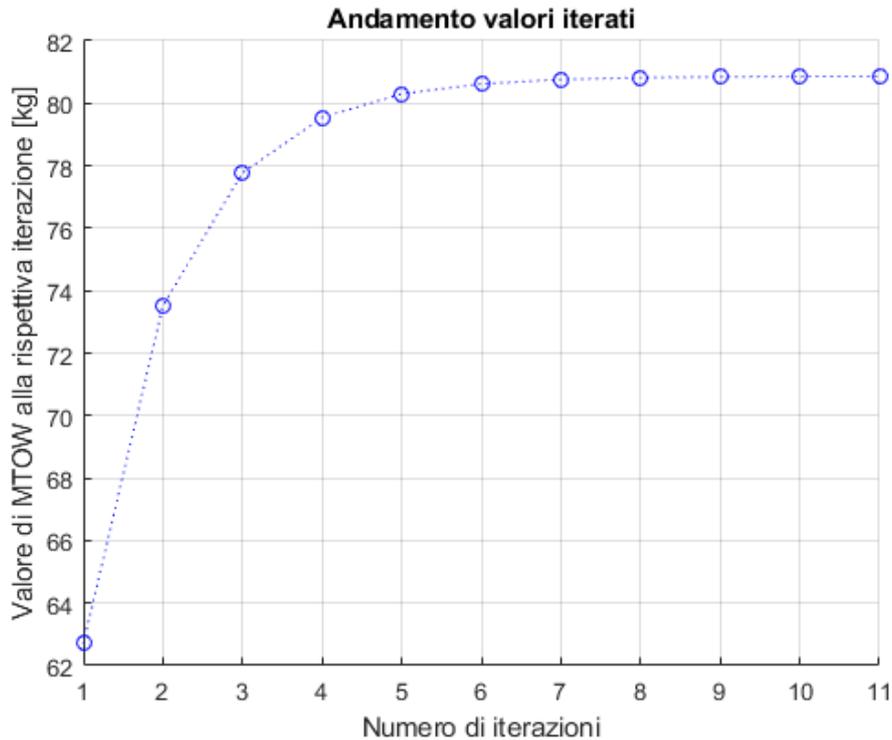


Figura 2.10: Calcolo MTOM per iterazione

più pesanti (in questa fase si è pensato di migliorare l'affidabilità del sistema aumentando il rapporto spinta-peso rispetto ai sistemi analoghi della DJI, questo dovrebbe permettere di atterrare in modo sicuro anche con la perdita di un motore in volo). Il secondo è dovuto al sistema di distribuzione che risulta essere di peso superiore rispetto a uno tradizionale a causa dell'aggiunta dei bracci avvolgenti il vigneto.

Va fatto presente che il sistema di batteria è calcolato basandosi su una stima dei consumi e non su una modellazione del possibile profilo di missione. Una delle cose che è stata trascurata in questa fase è il range di utilizzo della batteria. La batteria non può essere utilizzata per la totalità di energia che immagazzinata, questo porterebbe a un deterioramento dopo pochi cicli di utilizzo, si dovrà predisporre un sistema di protezione che, ad esempio, non faccia scendere la carica sotto il 30% e sopra il 95%.

2.4 Analisi costo UAV

In questa sezione si espone un'idea di vendita del prodotto studiato in questa tesi. Vendere il prodotto per far distribuire il prodotto direttamente dal proprietario del vigneto potrebbe non essere l'idea migliore dal punto di vista economico, essendo un prodotto completamente rivoluzionario e di difficile gestione. Un'idea potrebbe essere quella di sviluppare il prodotto per poi fornire il servizio di distribuzione da un ente specializzato che si occupa specificatamente di questo compito. Questa soluzione gioverebbe al presente studio perché risulta complesso confrontare i costi che si hanno attualmente per distribuire i prodotti fitosanitari in modo tradizionale (per mezzo di trattori o per via manuale) con quelli dell'UAV. Risulta più facile, invece, calcolare il costo complessivo della distribuzione effettuata da un ente terzo.

Questo porta l'attenzione non sul costo dei singoli mezzi di distribuzione, ma sul confronto fra i costi attualmente in uso e quelli previsti dal sistema in analisi nella sua funzione complessiva. Un altro vantaggio di questa scelta è quella di considerare la difficoltà di utilizzo e di manutenzione di un sistema altamente ingegneristico. L'uso di un UAV rispetto a un trattore è molto più complesso e va gestito da personale specializzato.

Di seguito è riportato il confronto fra i tre metodi di distribuzione fitosanitaria.

2.4.1 Trattamento con cannone

Il trattamento con il cannone presenta i vantaggi e gli svantaggi visti nella sezione 1.1.1, sicuramente il vantaggio più grosso è quello economico. La distribuzione con questo sistema è caratterizzata da un costo più basso in assoluto a scapito della qualità di distribuzione del trattamento, dell'impatto ambientale e della sicurezza degli operatori. Un ettaro di terreno viene trattato in circa un'ora di tempo, se questo viene svolto da un ente esterno alla realtà vitivinicola il costo è di circa 100euro per ettaro senza considerare il consumo di 500 lt di acqua e il costo del prodotto da distribuire.

Va fatto presente però che per molti vigneti questo è un metodo inutilizzabile per la mancanza di strade adibite al passaggio del cingolo. Oltre a questo, essendo un metodo molto invasivo a livello globale, se ne prevede la rimozione dal mercato.

2.4.2 Distribuzione trattamento a mano

La distribuzione del trattamento a mano è la più costosa, stancante, difficile e lunga da effettuare. Pertanto, molti vigneti in cui non è possibile effettuare trattamenti meccanizzati, sono stati abbandonati. Questo perché la vendita dell'uva non presentava differenza di guadagno se coltivata in luoghi pianeggianti, piuttosto che in luoghi difficili da lavorare. Attualmente però, come si è visto nei precedenti capitoli, non è così.

Il costo della lavorazione a mano di un ettaro di terreno la si può fare considerando che un operatore ha un costo di circa $10\text{euro}/\text{ora}$ e che per distribuire il prodotto su 1 ettaro di terreno ci mette circa una giornata di lavoro, questo è anch'esso pari a 100euro . Da considerare il fatto che resta un lavoro molto stancante e che è sempre più difficile trovare operatori che svolgano questo tipo di lavoro.

Oltre a questa cifra bisogna tenere in considerazione la macchina per effettuare il trattamento, che è una sorta di lancia idropulitrice collegata tramite un tubo di distribuzione al trattore. Sul trattore è presente una macchina che permette la distribuzione del prodotto pressurizzato. Il sistema di distribuzione del prodotto tra costi del carburante e spese di ammortamento della macchina è approssimabile a circa 50euro a ettaro.

2.4.3 Distribuzione tramite UAV

Il calcolo in questo capitolo verrà effettuato su due fronti: il primo è quello del costo di utilizzo della macchina (consumi e ore di lavoro dell'operatore); il secondo è il costo della macchina a livello di produzione e componentistica.

Ipotizzando di effettuare il trattamento a un ettaro di terreno con un UAV è necessario considerare 10 sostituzioni di serbatoio+batteria. Il tempo massimo per effettuare un profilo di missione completo è pari a $880\text{s} \approx 15\text{min}$ mentre quello per la sostituzione della batteria e la ricarica del serbatoio si stima essere pari a 5min . Questo porta a un tempo totale per effettuare una distribuzione di 500m lineari pari a 20min , la stima di questo dato è conservativa. Moltiplicando questo per 10 volte, per arrivare al trattamento di un ettaro, sono necessari in totale circa $200\text{min} \approx 4\text{ore}$. L'operatore che svolge il compito di guida e sostituzione batteria indicativamente avrà un costo di $12 - 15\text{euro}/\text{ora}$, il che porta a un costo di circa 60euro per ettaro.

Considerando però che il costo dell'operatore può essere drasticamente ridotto se l'UAV riuscisse a operare in modo autonomo durante la fase di distribuzione prodotto. In questo modo l'operatore dovrebbe occuparsi solo più della sostituzione dei componenti a fine profilo di missione e quindi lavorare in parallelo con più UAV. Se ad esempio si avessero 3 UAV in parallelo il tempo si ridurrebbe a 1 ora e 20 min riducendo drasticamente il costo a circa 20euro per ettaro. Si prevede con questi calcoli che possano operare solo 3 droni in parallelo avendo comunque da sostituire batteria+serbatoio in 5min e il tempo del profilo di missione pari a 15min .

A questo è necessario sommare il costo di ammortamento dell'UAV vero e proprio, che al momento non è facile da stimare.

Capitolo 3

PROGETTAZIONE DETTAGLIATA

Si entra nella fase di sviluppo vera e propria del prodotto con l'introduzione di strumenti CAD procedendo al dimensionamento e all'ottimizzazione dell'arrangiamento dei componenti.

Il sistema macroscopico è definito: la configurazione corrisponde a un esacottero elettrico. Verrà di seguito definito, come da rispettiva normativa italiana, il termine SAPR quando si tratta del sistema completo e APR quando si tratta del solo sistema volante.

3.1 Propulsione e avionica di bordo

In questa sezione vengono analizzati nel dettaglio i componenti assegnando loro la geometria e il peso. Dopo aver mostrato i componenti si effettuerà una schematizzazione che permetterà una visione d'insieme. Si analizza di seguito la catena di componenti, visibile in figura 3.1, che illustra il collegamento tra il computer di bordo che gestisce la dinamica del volo (controllore di volo) con la creazione della forza aerodinamica che viene creata dalle eliche collegate al motore.

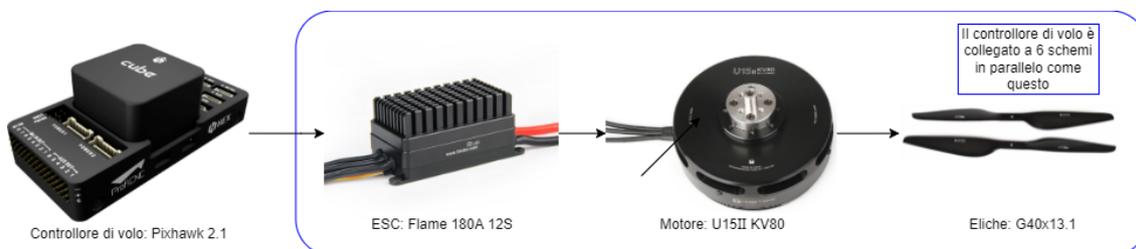


Figura 3.1: Catena di componenti dal controllore di volo all'elica

3.1.1 Controllore di volo Pixhawk 2.1

Il controllore di volo, come già fatto precedentemente presente, è essenziale per tradurre i comandi di alto livello di un operatore umano dotato di un dispositivo di interfacciamento, come un joystick o un radiocomando, nelle tensioni da applicare al sistema motore dell'APR. Il controllore di volo permette il controllo simultaneo delle velocità di rotazione di più motori per ottenere la risposta voluta dal pilota. Il sistema scelto è il Pixhawk 2, sviluppato all'interno del progetto open source PX4, scelta effettuata anche per questa sua "apertura" in quanto programmabile per eventuali modifiche. Il miglioramento introdotto nella versione 2 della Pixhawk consiste nel cosiddetto "Cube" che include una Inertial Management Unit (IMU) con tripla ridondanza. Questa è isolata e smorzata e possiede un sistema di controllo termico che la rende adatta a operare in climi con range di temperature notevoli. Il sistema è utile nel caso in cui si vada a lavorare in piena estate con esposizione al sole, condizione quasi sempre presente durante il profilo di missione. La Pixhawk 2.1 standard dispone quindi di una IMU che si basa sui dati forniti dai sensori installati a bordo che, nel caso in questione, sono:

- 3 accelerometri;
- 3 giroscopi (ST Micro a 16 bit);
- 3 magnetometri (ST Micro a 14 bit);
- 2 barometri.

Una IMU standard ha 3 accelerometri che misurano i vettori di accelerazione nelle tre direzioni e tre giroscopi che misurano le rotazioni intorno agli assi. I dati che vengono da entrambi sono dunque combinati via software per determinare l'assetto reale e il movimento del velivolo per creare una AHRS cioè una Altitude Heading Reference System. In sostanza la combinazione della IMU e del software necessario a interpretare le uscite dei sensori serve a stabilire il piano su cui si trova il velivolo e il suo orientamento.

Al Cube si possono collegare più sistemi GPS con precisione centimetrica. A questa si aggiunge il modulo Here + RTK GNSS, che fornisce informazioni di precisione grazie alla ricezione di più GNSS dei sistemi attualmente più efficienti, inclusi GPS, GLONASS e Galileo. Grazie a questo si fruisce della massima ricezione satellitare.

Le informazioni combinate dall'insieme dei sensori vengono usate per il controllo di feedback alle tensioni applicate ai motori per mantenere la stabilità del volo. Il controllore attinge al campo della teoria del controllo, e sono necessari modelli matematici per costruire i sistemi di controllo usati per far funzionare gli UAV ad ala rotante. Molti metodi diversi sono stati utilizzati per il controllo dei quadricotteri come i controllori PID (PID, "proportional integral gain") o i controllori LQR

(LQR, "linear quadratic regulator"). Una panoramica dei sistemi di controllo, guida e navigazione di questo sistema viene visionata nel capitolo 3.3.

Per molti anni, la difficoltà di controllare indipendentemente quattro o più eliche senza assistenza elettronica ha bloccato lo sviluppo tecnologico degli UAV ad ala rotante. Il controllo elettronico rivoluzionario dei multicotteri è diventato possibile grazie ai progressi nella tecnologia dei microprocessori che hanno portato alla miniaturizzazione e alla riduzione dei costi dei controllori di volo.

Le caratteristiche geometriche del controllore di volo vengono riportate nella tabella 3.1 e il componente viene schematizzato attraverso il CAD come nella figura 3.2.

Grandezza	Misura
Peso [g]	38
Altezza [mm]	15.5
Larghezza [mm]	50
Lunghezza [mm]	81.5

Tabella 3.1: Caratteristiche geometriche Pixhawk 2.1

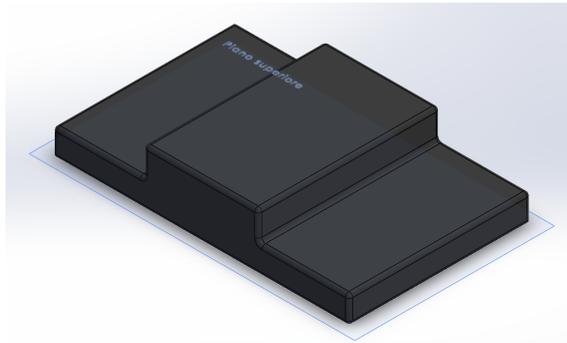


Figura 3.2: Componente CAD: Controllore di volo Pixhawk 2.1

3.1.2 Motore T-Motor U15II KV80

Il motore permette di trasformare l'energia elettrica in energia meccanica, il motore brushless riduce l'attrito e questo implementa l'efficienza come si è già fatto presente. I motori brushless sono caratterizzati da una corrente elettrica e da una velocità di rotazione, considerando la massima velocità di rotazione ω_0 che si può ottenere in condizioni prive di carico, questa si può ottenere da: $\omega_0 = K_V * V$. Il parametro K_V è del motore mentre V è la tensione applicata.

Quando si applica tensione al motore, questo preleva corrente e il motore esercita una coppia sull'albero. L'albero viene accelerato finché la coppia esercitata è uguale alla coppia di carico, comprese le perdite meccaniche. A basse velocità di rotazione, lontane dalle prestazioni massime del motore, la coppia esercitata è proporzionale alla tensione applicata, come quantificato dalla costante di coppia del motore K_T nella formula seguente

$$\tau = K_T(I - I_0)$$

Dove τ rappresenta la coppia prodotta dal motore, I la corrente di ingresso, I_0 la corrente a vuoto e K_T la costante di proporzionalità della coppia.

Per questo progetto si è scelto di usare il motore T-Motor U15II KV80, questo permette all'APR di avere un buon rapporto spinta peso e mantenere alte le prestazioni. Nella fascia dei motori che possono soddisfare i requisiti del sistema, questo è quello con il rendimento migliore, vedi tabella 2.3.

Le caratteristiche geometriche del motore vengono riportate nella tabella 3.2 e il componente viene schematizzato attraverso il CAD come nella figura 3.3.

Grandezza	Misura
Peso [g]	1740
Altezza [mm]	64
Larghezza [mm]	147.5

Tabella 3.2: Caratteristiche geometriche T-Motor U15II KV80

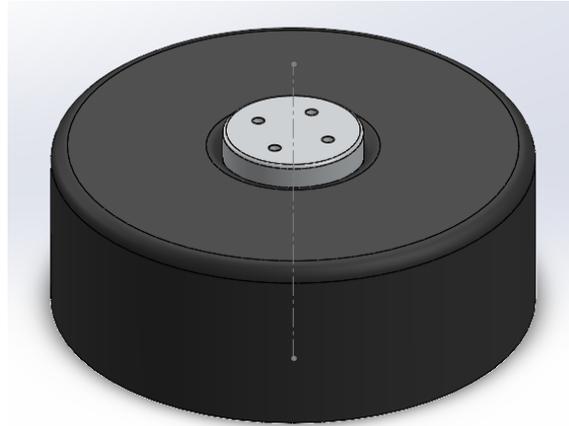


Figura 3.3: Componente CAD: Motore U15II KV80

3.1.3 Elica G40x13.1

L'elica ruota orizzontalmente e genera spinta ortogonalmente alla direzione di rotazione. I parametri funzionali delle eliche sono: diametro, calettamento e numero di pale.

Alcuni UAV hanno pale del rotore racchiuse in involucri costruiti nel telaio. Questa configurazione permette di volare in ambienti più stretti e difficili e quindi riduce il rischio di danneggiare l'UAV o l'ambiente circostante. Molti UAV commerciali hanno eliche pieghevoli per facilitare il trasporto. Le eliche sono la principale fonte di rumore udibile dagli UAV. Ci sono preoccupazioni circa i disturbi per i residenti e la fauna selvatica, e gli studi sul rumore delle eliche possono diventare sempre più importanti. Il rumore riflette anche la perdita di potenza dalla spinta alla turbolenza. Diversi produttori di UAV si sono concentrati sul miglioramento del design dell'elica verso il duplice obiettivo di ridurre il rumore e aumentare la spinta.

Per questo progetto si è scelta l'elica abbinata al motore, modello G40x13.1, le caratteristiche geometriche vengono riportate nella tabella 3.3 e il componente viene schematizzato attraverso il CAD come nella figura 3.4.

Grandezza	Misura
Peso [g]	237
Diametro [mm]	1016
Larghezza [mm]	332.7

Tabella 3.3: Caratteristiche geometriche elica G40x13.1

E' un elica in carbonio, per ora si presuppone che il sistema non sia intubato.

3.1.4 ESC FLAME 180A 12S

Per i motori brushless l'ESC è necessario per effettuare la commutazione elettrica, la velocità di ogni motore è controllata da un separato ESC. Tutti gli ESC sono connessi al PDB (Power Distribution Board), che è a sua volta connesso con il controllore di volo che trasporta la direzione voluta dal pilota in una tensione da portare ai motori. L'ESC permette di trasferire la corrente

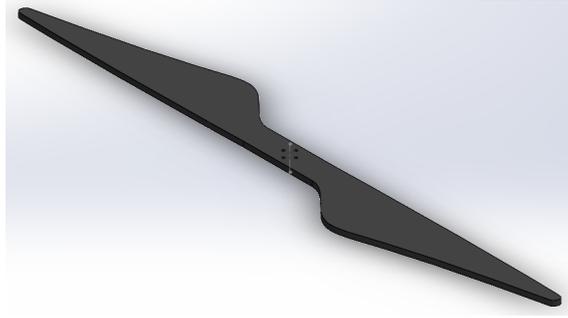


Figura 3.4: Componente CAD: Elica G40x13.1

dalla batteria al motore sotto una tensione costante. Durante il progetto è necessario selezionare la corrente massima del motore, per questo progetto il motore a massima spinta consuma $110.4Ah$, considerando l'ECS FLAME 180A 12S V2.0, questo è sovradimensionato del 60%.

Le caratteristiche geometriche dell'ECS vengono riportate nella tabella 3.4 e il componente viene schematizzato attraverso il CAD come nella figura 3.5.

Grandezza	Misura
Peso [g]	279
Lunghezza [mm]	112.2
Larghezza [mm]	50.5
Altezza [mm]	35.5

Tabella 3.4: Caratteristiche geometriche ESC FLAME 180A 12S

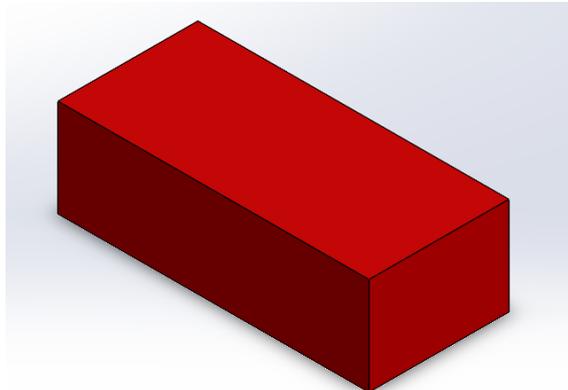


Figura 3.5: Componente CAD: ESC FLAME 180A 12S

3.1.5 Funzionamento ESC

Una particolare nota va fatta sul funzionamento dell'ESC. Fra le tecniche di funzionamento ha acquistato sempre più importanza quella basata sulla modulazione a larghezza di impulsi (PWM: pulse width modulation). Nata originariamente per gli alimentatori a commutazione, questa tecnica si è rilevata particolarmente adatta per il controllo dei motori e degli attuatori in genere. La vecchia tecnica del pilotaggio analogico (controllo o regolazione lineare) prevedeva una resistenza R che dissipava potenza attraverso la trasformazione di energia elettrica in energia termica (effetto joule), vedi figura 3.6-a. In quel caso però si ha una bassissima efficienza a causa della elevata potenza dissipata nella resistenza e ciò porta il sistema ad essere praticamente inutilizzabile per dispendio

energetico troppo elevato. Il problema viene risolto con la tecnica PWM che funziona con un segnale di tensione di tipo impulsivo, vedi figura 3.6-b.

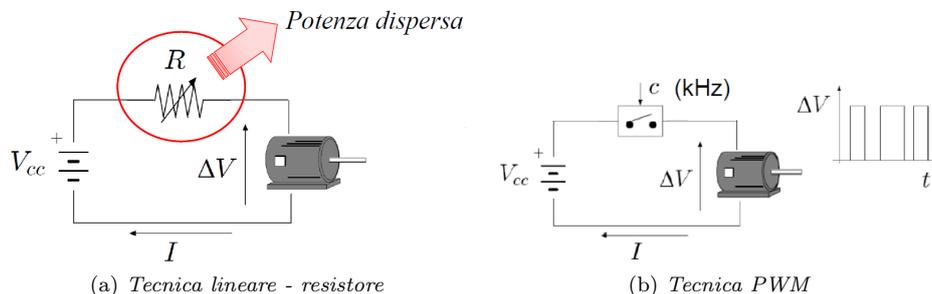


Figura 3.6: Controllo della potenza ESC

La tecnica di commutazione PWM consente un efficace controllo della velocità del motore. Quest'ultimo viene alimentato con una tensione di armatura che, anziché continua, ha un andamento rettangolare o impulsivo, con periodo T costante e ciclo di utilizzo (duty cycle) variabile. In figura 3.7 sono riportati degli esempi della tensione di armatura per un duty cycle rispettivamente del 50% (a), 75% (b) e 25% (c).

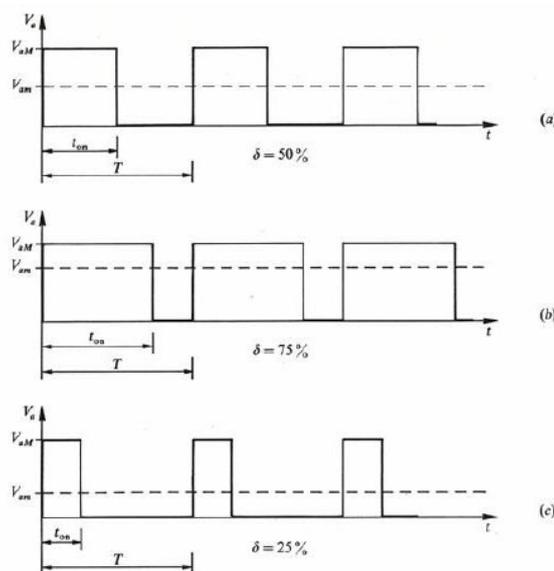


Figura 3.7: Esempi regolazione PWM

La frequenza della tensione di alimentazione viene scelta da qualche kHz in su, fino ai 20 kHz o più, questo per evitare la generazione e la diffusione, attraverso i conduttori di alimentazione alla carcassa del motore, di rumore nella gamma delle frequenze udibili [21].

3.2 Batteria installata

Nel capitolo 2.2.1 si è scelto di utilizzare batterie ai polimeri di litio (LiPo), le quali sono attualmente le più utilizzate, questo sia per l'elevata densità di energia, sia per le elevate capacità di scarica di corrente: $5 < C - Rate < 12$. Per il dimensionamento iterativo fatto al capitolo 2.3 si è considerata una densità energetica di $200Wh/kg$, questo però va corretto con un valore più realistico del sistema e per fare ciò si prenderanno in considerazione dei sistemi di batteria attualmente in commercio.

Si confrontano tre sistemi di batterie trovati, il primo corrispondente al sistema consigliato dalla marca costruttrice del motore (T-Drones - ARES 6S 30000mAh) [7], il secondo è fabbricato

da un'azienda specializzata alla produzione di batterie in campo aeronautico/UAV (Kokam UHE NMC) [6] e l'ultimo è un modello trovato online per UAV RC [9]. Le caratteristiche sono riportate in tabella 3.5.

Caratteristica	T-Drones - ARES	Kokam UHE	Tattu 28000mAh
Capacità nominale [Ah]	30	26	28
Tensione nominale [V]	22.2	3.67	22.2
Energia nominale [Wh]	666	95.4	622
Massa [g]	2570	387	3389
Densità di energia [Wh/kg]	259	249	184
Dimensioni (LxPxH) [mmxmmxmm]	90x210x68	99x275x7.9	200x120x65
Energia su volume [Wh/l]	520	573	400
Limite minimo di tensione [V]	18	2.7	18
Limite massimo di tensione [V]	25.2	4.2	25.2
Corrente limite di carica [A]	150 (5C)	26 (1C)	336 (12C)
Corrente limite di scarica [A]	300 (10C)	52 (2C)	700 (25C)

Tabella 3.5: Confronto Batterie

La tensione di queste celle dipende dallo stato di carica, va fatto presente che scaricare la cella LiPo sotto la tensione limite può portare a danni permanenti, pertanto si consiglia di caricarla arrivati a una profondità di scarica (DoD - Depth Of Discharge) pari all'75%.

Le celle si possono collegare in serie (S) o in parallelo (P), in questo caso si studia il compromesso che soddisfi le richieste del sistema attraverso un codice MATLAB chiamato *Dimensionamento Batterie* e riportato nella sezione B.3

3.2.1 Dimensionamento Batteria

In questa sezione avviene il calcolo del numero di celle necessarie al sistema per soddisfare il fabbisogno energetico della missione e quindi dell'energia totale (E_{tot}). Va tenuto conto del fatto che non si può sfruttare tutta la capacità disponibile del pacco batteria, come già accennato, per questioni di sicurezza. Quindi per una cella Li-Po in cui si suppone che la scarica sia fino al 20% della capacità e la carica fino al 95% della capacità ne risulta che si può soltanto sfruttare il 75% della capacità complessiva di un pacco batterie.

In questa fase, per il dimensionamento della batteria, si fa riferimento al calcolo di energia necessaria per completare la missione effettuato al capitolo 2.3. Questo valore è pari a $4200Wh$, comprende tutte le fasi di volo del velivolo, facendo un calcolo molto conservativo (sia per quanto riguarda i valori di tempo di A/R dal filare che per quanto riguarda i valori di rapporto spinta-peso). Oltre a questo valore serve quello relativo alla tensione del motore che genera spinta: $50V$ e il valore di potenza richiesta dai 6 motori in condizione di massima spinta $Potenza_{max} * Num_{motori} = 5520W * 6 = 33120W$.

Celle in serie

I motori elettrici, come fatto presente prima, usano una tensione di $50V$ DC (V_{motor}), la tensione nominale della cella è riportata in tabella 3.5 in funzione del modello. Con questi dati è possibile calcolare direttamente il numero di celle in serie mediante la seguente espressione.

$$N_s = \frac{V_{motor}}{V_{cella}}$$

Il valore, salvo fortunati casi, non sarà un numero intero. Essendo il numero di giri ottenibile in funzione del valore di tensione del motore, la tensione di $50V$ la si raggiunge solo quando il motore richiede massima potenza. Quindi, per scegliere se arrotondare per eccesso o per difetto, in questo caso di studio, si considera non solo il valore di tensione nominale, ma anche quello di tensione con la batteria al 100% della carica (limite massimo di tensione).

Considerando il calcolo per le tre batterie prese in considerazione si riportano i valori in tabella 3.6.

Caratteristica	T-Drones - ARES	Kokam UHE	Tattu 28000mAh
Tensione nominale [V]	22.2	3.67	22.2
Limite massimo di tensione [V]	25.2	4.2	25.2
Numero di celle in serie (Teoriche)	2.25	13.62	2.25
Numero di celle in serie (Reali)	2	13	2

Tabella 3.6: Numerdo di celle in serie

Considerando i valori ottenuti è evidente che in tutti e tre i casi si può approssimare il valore per difetto, questo viene fatto per ridurre il peso a scapito di una più bassa tensione ai motori. Per un sistema di questo tipo, in cui i motori richiedono spinta massima in poche situazioni e generalmente a inizio missione (dove si ha tutto il peso del prodotto fitoterapico), questo non crea problemi.

Celle in parallelo

Il dimensionamento del numero di celle in parallelo avviene per soddisfare sia i requisiti di potenza elevata (brevi fasi in cui i motori richiedono molta potenza) sia per i requisiti di energia (fornire energia a tutta la durata della missione). Per soddisfare i due requisiti è necessario approssimare questa volta il numero di celle per eccesso, questo per non rischiare di non soddisfare i requisiti. Oltre all'approssimazione per eccesso è anche necessario essere conservativi, ovvero scegliere il numero di celle più elevato rispetto ai due calcoli eseguiti in seguito, per riuscire a soddisfare entrambi i requisiti.

1. Dimensionamento in termine di potenza

Come già accennato, il tasso di scarica è un numero che esprime il tempo di scarica della batteria. Mediante la seguente formula si può calcolare il numero di celle in parallelo corrispondente ($NP1$).

$$NP1 = \frac{I_{max}}{C_{rate} \cdot Q_{cella}}$$

con

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{V_{motor}}$$

Dove I_{max} è la corrente complessiva richiesta al pacco batteria in condizione di massima spinta, il C_{rate} è il tasso di scarica della cella, la Q_{cella} è l'intensità di corrente della cella, la P_{max} è la massima potenza richiesta dai motori e la V_{motor} è la tensione del motore stesso.

Caratteristica	T-Drones - ARES	Kokam UHE	Tattu 28000mAh
Capacità nominale [Ah]	30	26	28
C-rate di scarica	10C	2C	25C
Limite massimo di tensione [V]	25.2	4.2	25.2
Numero di celle in parallelo (Teoriche)	2.20	12.74	0.95
Numero di celle in parallelo (Reali)	3	13	1

Tabella 3.7: Numerdo di celle in parallelo dimensionate in termine di potenza

I risultati riportati in tabella 3.7 sono da confrontare successivamente con quelli del calcolo in termine di energia.

2. Dimensionamento in termine di energia

Per soddisfare il fabbisogno energetico di tutte le fasi di volo si fa riferimento al calcolo di energia totale necessaria per completare la missione e del coefficiente di capacità utilizzabile

della batteria. In questo sistema si usa un coefficiente di capacità utilizzabile uguale per tutte e tre le batterie e pari al 75%. Nella seguente formula si ha il calcolo del numero di celle in parallelo che soddisfano il fabbisogno energetico per completare la missione.

$$N_{P2} = \frac{E_{batt}}{V_{motor} \cdot Q_{cella}}$$

Dove E_{batt} è la quantità di energia totale per completare la missione e Q_{cella} la capacità utilizzabile di ogni cella. I risultati sono riportati in tabella 3.8

Caratteristica	T-Drones - ARES	Kokam UHE	Tattu 28000mAh
Capacità nominale [Ah]	30	26	28
Numero di celle in parallelo (Teoriche)	3.73	4.31	4.00
Numero di celle in parallelo (Reali)	4	5	4

Tabella 3.8: Numero di celle in parallelo dimensionate in termine di energia

E' quindi possibile affermare che il numero di celle in parallelo atto a soddisfare sia i requisiti in termini di potenza massima che per i requisiti in termini di tutta l'autonomia missione è:

- T-Drones - ARES: $N_{P2} = 4$;
- Kokam UHE: $N_{P2} = 13$;
- Tattu 28000mAh: $N_{P2} = 4$;

Numero di celle totali

Il numero di celle totali è quindi il prodotto tra il numero di celle in serie e quelle in parallelo, i valori dei sistemi analizzati sono riportati in tabella 3.9. Insieme al valore del numero di celle totali sono riportati anche i risultati che il programma MATLAB con nome *Dimensionamento Batteria* (vedi dettaglio nella sezione B.3).

Caratteristica	T-Drones - ARES	Kokam UHE	Tattu 28000mAh
Numero di celle in serie	2	13	2
Numero di celle in parallelo	4	13	5
Numero di celle totali	8	169	10
Massa celle totali [kg]	20.56	65.403	33.89
Massa celle + sistema totale [kg]	21.6421	68.8453	35.6737
Densità energetica del sistema [Wh/Kg]	194.085	61.0122	117.745
Volume occupato [dm ³]	10.2816	36.3481	15.6
Volume occupato con l'involucro [dm ³]	12.852	45.4351	19.5
Densità della cella [kg/dm ³]	1.999	1.799	2.172
La densità volumetrica [Wh/dm ³]	544.714	154.081	359.009

Tabella 3.9: Confronto sistemi analizzati

La batteria che maggiormente soddisfa i requisiti è la prima analizzata: **T-Drones - ARES**, di seguito vengono giustificati i risultati. Analizzando i tre candidati si può notare come la batteria T-Drones - ARES sia una via di mezzo in termini di caratteristiche: possiede un valore di densità energetica e un C-Rate intermedio tra le tre. Nonostante la batteria Kokam UHE presenti una densità energetica migliore tra le tre non riesce a soddisfare il picco di potenza richiesta in modo ottimale. Infine, la batteria Tattu 28000mAh risponde molto bene a una richiesta di picco, ma male alla quantità di energia totale dovendo aumentare celle per soddisfare il fabbisogno energetico a scapito del peso del sistema.

Le celle del sistema occupano una percentuale di peso complessivo del pacco batteria, per effettuare questi conti si è deciso di considerare il peso delle sole celle come il 95% del sistema completo. Una stima del peso totale del pacco batteria è data dalla seguente formula.

$$W_{sistema} = \frac{N_{totali} \cdot W_{cella}}{Coeff_{PesoSistema}}$$

Dove N_{totali} è il numero di celle totali, W_{cella} è il peso della singola cella e $Coeff_{PesoSistema}$ è la percentuale di peso di una singola cella contenuta in un sistema di pacco batteria. Questa stima del peso include tutti i componenti ausiliari: le strutture del pacco batteria; i collegamenti elettrici; il sistema di gestione della batteria (BMS) e il sistema di raffreddamento. Questi elementi sono tutti necessari per il corretto funzionamento del sistema di batterie.

3.2.2 Dimensioni batteria sistema

Dopo aver fatto il dimensionamento è necessario effettuare una schematizzazione CAD per il sistema batteria di modo da riuscire a creare l'assieme sistema con lo scopo di unire le parti e trovare una soluzione geometrica e strutturale al telaio.

In tabella 3.9 sono riportati due volumi. Il primo valore è il *Volume occupato* che è il delle celle, questo viene calcolato come la somma del volume di ogni cella per il numero di celle del sistema. In verità le celle oltre ad avere i sistemi ausiliari che pesano e occupano volume, ma viene anche lasciato spazio tra le varie celle per favorire lo scambio di calore con l'esterno. Il secondo valore infatti è il *Volume occupato con l'involucro*, questo è dato dal volume moltiplicato per un fattore moltiplicativo maggiore di uno. Per questo sistema si è deciso di maggiorare il volume di un valore pari al 125%.

Per costruire il modello CAD della batteria, componente molto importante nel sistema, si decide di creare due possibili soluzioni per poi verificare la più fattibile durante la realizzazione del telaio. La prima soluzione prevede di posizionare tutte le celle in un unico involucro, mentre la seconda di suddividere le celle in due involucri diversi. La prima soluzione ha il vantaggio di non avere il cablaggio per connettere i due involucri, mentre la seconda ha il vantaggio di suddividere il peso permettendo di posizione i due involucri in posizioni differenti suddividendo il carico concentrato.

Le caratteristiche geometriche della batteria vengono riportate nella tabella 3.10 e il componente viene schematizzato attraverso il CAD come nella figura 3.8. Si può notare dall'immagine che sono state posizionate le celle distaccate per rispecchiare l'ampliamento di volume di cui si è discusso in precedenza.

Grandezza	Soluzione 1	Soluzione 2
Peso [kg]	10.8	21.6
Larghezza [mm]	99.4	198.8
Profondità [mm]	227.4	227.4
Altezza [mm]	296.4	296.4
Volume [dm^3]	13.4	6.7

Tabella 3.10: Caratteristiche geometriche batteria sistema

3.3 Dinamica del volo

L'elicottero in questione è classificato come un veicolo aereo privo di equipaggio (SAPR) ed è classificato all'interno del gruppo dei velivoli ad ala rotante. I velivoli ad ala rotante sono i più comuni nella categoria degli SAPR, avendo il grosso vantaggio di eseguire decolli e atterraggi verticali (VTOL) non necessitando quindi di una pista di atterraggio. Vista la scelta al capitolo 2.1.2 di sei rotori con rispettive eliche, il sistema è in grado di sollevare carichi pesanti, garantire un'ottima stabilità e volare anche in condizioni di failure di un motore (se ben dimensionato il sistema propulsivo); questa scelta tuttavia porta complicazioni aggiuntive per la dinamica del volo rispetto al quadricottero.

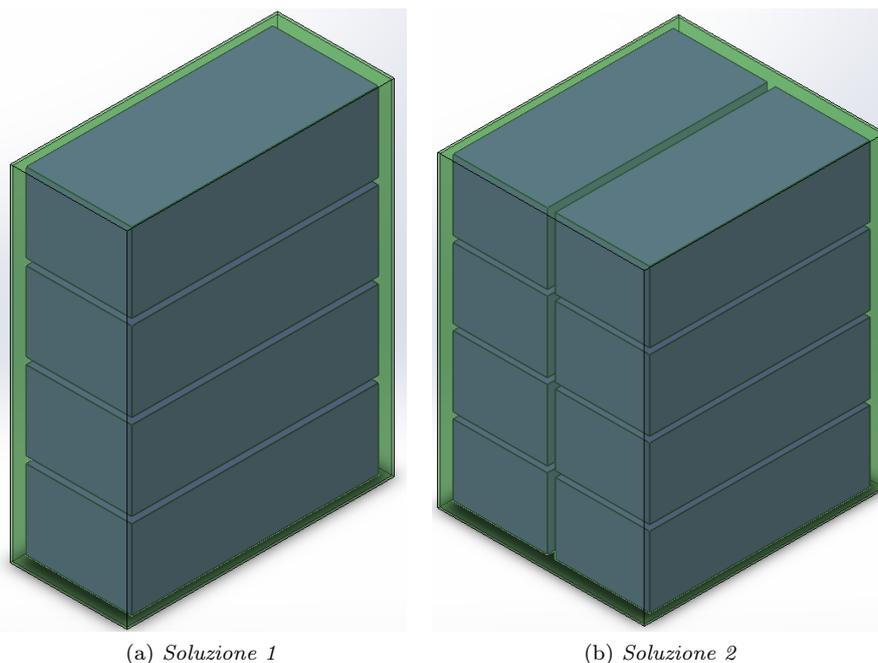


Figura 3.8: Componente CAD: batteria

L'esacottero in questione viene mosso da 6 rotori posti all'estremità del telaio. Il telaio dell'esacottero viene semplificato e riportato in figura 3.9 [27].

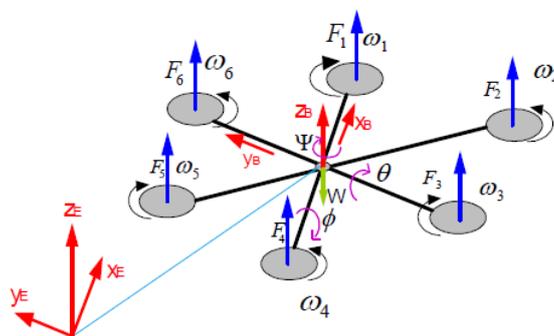


Figura 3.9: Telaio dell'esacottero semplificato [27]

Per scrivere le equazioni che governano la dinamica del volo di un velivolo in generale bisogna definire opportuni sistemi di riferimento: come si nota in figura 3.9 vengono riportati due riferimenti in colore rosso. Il primo in basso a sinistra è il sistema di riferimento inerziale E (Earth Frame) che ha origine su un punto situato sulla superficie terrestre e il secondo con origine sul baricentro del sistema è il riferimento B (body frame) del velivolo.

3.3.1 Angoli e matrice di rotazione

L'assetto è definito dall'orientamento del telaio del corpo (assi body) rispetto al riferimento di terra (assi inerziali). In figura 3.10-a si rappresenta l'APR con gli assi body e in figura 3.10-b le rotazioni intorno agli assi x, y e z; in questo caso usando la regola della mano destra [14]. La posizione angolare del telaio del corpo rispetto a quello inerziale è definita dagli angoli di Eulero: rollio (ϕ), beccheggio (θ) e imbardata (ψ). Gli angoli di Eulero insieme vengono a formare il vettore $\eta = [\phi, \theta, \psi]^T$. Si è scelto come asse X_{body} quello di avanzamento dell'APR durante la distribuzione del prodotto fitosanitario, l'asse Z_{body} parallelo alla spinta dei motori con verso verso l'alto e l'asse Y_{body} di conseguenza.

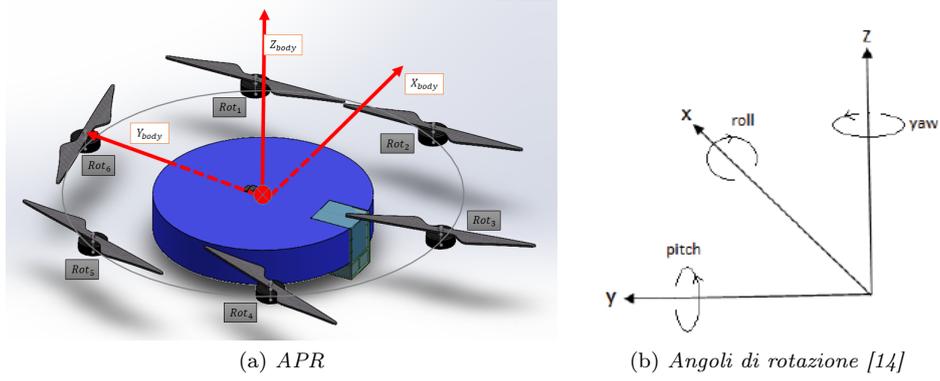


Figura 3.10: Assi Body

Il **Rollio** è la rotazione che avviene intorno all'asse X_{body} e la si ottiene abbassando/aumentando la velocità dei rotori 2, 3 e 4 e allo stesso tempo aumentando/abbassando la velocità dei rotori 5, 6 e 1. Il sistema agisce sull'angolo di rollio variando la velocità di rotazione dei rotori creando così un'accelerazione angolare sull'asse x-body ($\ddot{\phi}[rad/s^2]$). Quest'accelerazione fa nascere una velocità angolare ($\dot{\phi}[rad/s]$) con conseguente variazione dell'angolo di rollio ($\phi[rad]$) e il raggiungimento dell'assetto desiderato.

Il **Beccheggio** è la rotazione intorno all'asse Y_{body} e la si ottiene abbassando/aumentando la velocità dei rotori 1 e 2 e allo stesso tempo aumentando/abbassando la velocità dei rotori 4 e 5. Il sistema agisce sull'angolo di beccheggio variando la velocità di rotazione dei rotori creando così un'accelerazione angolare sull'asse y-body ($\ddot{\theta}[rad/s^2]$). Quest'accelerazione fa nascere una velocità angolare ($\dot{\theta}[rad/s]$) con conseguente variazione dell'angolo di beccheggio ($\theta[rad]$) e il raggiungimento dell'assetto desiderato.

L' **Imbardata** è la rotazione intorno all'asse Z_{body} e per controllarla si usa il fatto che ogni elica, quando ruota, causa una coppia intorno all'asse Z. Questa coppia è diretta in modo opposto alla rotazione dell'elica e quindi se l'elica ruota in senso orario causerà una rotazione in senso antiorario intorno all'asse Z e viceversa. Per mantenere l'esacottero stabile in imbardata è necessario che tre eliche ruotino in senso antiorario e tre in senso orario, in particolare per l'APR in questione si sceglie che i motori 1, 3 e 5 ruotino in senso orario mentre i motori 2, 4 e 6 in senso antiorario. L'imbardata la si ottiene quindi abbassando/aumentando la velocità dei rotori 2, 4 e 6 e allo stesso tempo aumentando/abbassando la velocità dei rotori 1, 3 e 5. In particolare, l'angolo di imbardata è ψ con unità di misura $[rad]$.

L'assetto è controllato cambiando le velocità dei rotori e il vettore $\epsilon = [x, y, z]^T$ riporta la posizione dell'APR rispetto al riferimento inerziale. È possibile individuare una matrice che permette di trasportare le componenti di un vettore dal sistema di riferimento Body al sistema di riferimento inerziale E. Si tratta della matrice di rotazione R ed è riportata di seguito.

$$R_{body} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \psi \sin \theta \sin \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \cos \psi \sin \theta + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \psi + \sin \theta \sin \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \psi \sin \theta - \cos \psi \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix}$$

Il grande vantaggio della matrice di rotazione è la sua caratteristica di essere ortogonale, questo permette di trovare la matrice inversa facendo semplicemente la trasposta.

$$(R_{body})^{-1} = (R_{body})^T = R_E$$

3.3.2 Equazioni del moto

Per effettuare simulazione, stima e controllo dell'esacottero viene sviluppato un modello che determina la sua dinamica. Per fare questo si usa il formalismo Newton-Eulero per descrivere la dinamica di un corpo rigido influenzato da forze e momenti esterni [14]. L'equazione seguente

descrive un corpo rigido soggetto a forze e momenti esterni.

$$\begin{bmatrix} mI_{3x3} & 0_{3x3} \\ 0_{3x3} & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}^B \\ \dot{\omega}^B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega^B \times mV^B \\ \omega^B \times I\omega^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F^B \\ \tau^B \end{bmatrix}$$

Dove $m[Kg]$ è la massa, $I[Nms^2]$ è il tensore di inerzia, $V^B = [u \ v \ w] [m/s]$ è la velocità lineare del baricentro del corpo, $\omega^B = [p \ q \ r] [rad/s]$ è la velocità angolare del baricentro del corpo, $F^B[N]$ sono le forze che agiscono sul telaio dell'elicottero, $\tau^B[Nm]$ sono i momenti che agiscono sul telaio dell'elicottero, 0_{3x3} è una matrice di zeri 3x3 e I_{3x3} è una matrice di uni 3x3. Usando l'approssimazione che il tensore di inerzia sia diagonale come segue

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix}$$

l'equazione diventa:

$$\begin{cases} mI_{3x3}\dot{V}^B + \omega^B \times mV^B = \begin{bmatrix} m\dot{u} \\ m\dot{v} \\ m\dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} mu \\ mv \\ mw \end{bmatrix} = F^B \\ I\dot{\omega}^B + \omega^B \times I\omega^B = \begin{bmatrix} I_{xx}\dot{p} \\ I_{yy}\dot{q} \\ I_{zz}\dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xx}p \\ I_{yy}q \\ I_{zz}r \end{bmatrix} = \tau^B \end{cases}$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} rv - qw \\ pw - ru \\ qu - pv \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{m}F_x^B \\ \frac{1}{m}F_y^B \\ \frac{1}{m}F_z^B \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I_{yy}-I_{zz}}{I_{xx}}qr \\ \frac{I_{zz}-I_{xx}}{I_{yy}}pr \\ \frac{I_{xx}-I_{yy}}{I_{zz}}pq \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{I_{xx}}\tau_x^B \\ \frac{1}{I_{yy}}\tau_y^B \\ \frac{1}{I_{zz}}\tau_z^B \end{bmatrix} \end{cases}$$

Queste ultime due equazioni sono valide per tutti i corpi rigidi, in particolare per descrivere l'elicottero è necessario definire in modo specifico le forze esterne F^B e i momenti esterni τ^B .

Forze agenti sull'APR

In seguito, verranno definite le forze in accordo con le assunzioni e i riferimenti di [14]. Le due forze principali che agiscono sul sistema provengono dalla gravità e dalla spinta dei rotori, ma per rendere il modello più realistico si includono anche la resistenza del rotore e l'attrito dell'aria.

Gravità La forza di gravità punterà sempre verso il basso lungo l'asse Z e quindi ha segno negativo rispetto al riferimento dato.

$$F_{gravita'}^B = R_E \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mg \sin \theta \\ -mg \cos \theta \sin \phi \\ -mg \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix}$$

Spinta La spinta è la potenza di sollevamento che permette il volo dell'elicottero e dipende dalle velocità delle sei eliche. Per mantenere la spinta totale del sistema costante, se la velocità di un'elica viene ridotta la velocità di un'altra viene aumentata; questo viene fatto quando si eseguono manovre di rollio, beccheggio o imbardata per evitare che si perda o si guadagni quota. Poiché il passo dell'elica è fisso la spinta totale dei rotori è sempre verso l'alto lungo l'asse z rispetto alla struttura del corpo. Di seguito si studia il caso di hovering e questa forza può essere approssimata dall'equazione seguente, dove $b[Ns^2]$ è una costante legata alla spinta.

$$F_{thrust}^B = b \sum_{i=1}^6 \Omega_i^2$$

Resistenza del rotore Secondo i riferimenti [29] e [20] c'è una forza di trascinamento che agisce sul corpo di qualsiasi multirottore durante il volo. Questa forza di trascinamento influenzerà le accelerazioni sugli assi X_{body} e Y_{body} e in condizioni di piccole perturbazioni può essere approssimata dalla seguente equazione, dove $\mu[Kg/s]$ è una costante.

$$F_{drag}^B = \begin{bmatrix} -\mu u \\ -\mu v \\ 0 \end{bmatrix}$$

Resistenza dell'aria La resistenza dovuta al fluido in cui è immerso il sistema è proporzionale alla velocità al quadrato, alle dimensioni e alla forma dell'oggetto secondo la seguente formula.

$$F_{air}^B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}C A_x \rho u |u| \\ -\frac{1}{2}C A_y \rho v |v| \\ -\frac{1}{2}C A_z \rho w |w| \end{bmatrix}$$

Con C una costante di attrito adimensionale, $A_i[m^2]$ l'area della sezione trasversale rispetto ai tre assi body e $\rho[kg/m^3]$ è la densità dell'aria.

Momenti agenti sull'APR

In seguito, verranno definiti i momenti in accordo con le assunzioni e i riferimenti di [14]. Come descritto precedentemente, aumentando/diminuendo la velocità dei sei rotori si creano coppie attorno agli assi x , y e z creando così rotazioni di rollio, beccheggio e imbardata. Dato che ci sono sei rotori invece dei più tradizionali quattro, la dinamica diventa leggermente più complicata ed è necessario utilizzare un po' di trigonometria. La coppia è la forza moltiplicata per una distanza e i rotori influenzano la rotazione totale attorno a un certo asse in modo diverso a seconda della loro distanza dal centro di gravità. La figura 3.11 mette in relazione la lunghezza e gli angoli dei bracci con la distanza relativa dal baricentro, questa è la distanza dal rotore all'asse di rotazione [14].

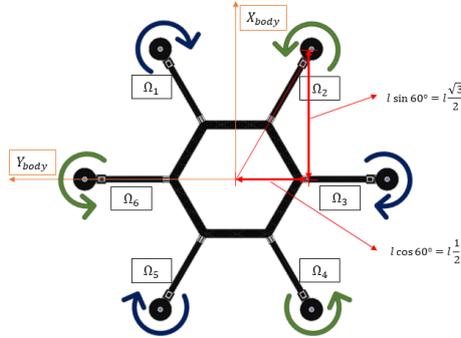


Figura 3.11: Distanze del rotore dell'esacottero dal centro di gravità

Momento di Rollio Diminuendo Ω_2 , Ω_3 e Ω_4 e aumentando Ω_5 , Ω_6 e Ω_1 si produce un momento di rollio positivo.

$$\tau_{rollio} = bl \left(-\Omega_3^2 + \Omega_6^2 + \frac{1}{2}(-\Omega_2^2 - \Omega_4^2 + \Omega_5^2 + \Omega_1^2) \right)$$

Momento di Beccheggio Diminuendo Ω_1 e Ω_2 e aumentando Ω_5 e Ω_4 si produce un momento di beccheggio positivo.

$$\tau_{beccheggio} = bl \frac{\sqrt{3}}{2} (-\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_5^2 + \Omega_4^2)$$

Momento di Imbardata Diminuendo Ω_2 , Ω_4 e Ω_6 e aumentando Ω_1 , Ω_3 e Ω_5 si produce un momento di imbardata positivo.

$$\tau_{imbardata} = d(+\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2 + \Omega_5^2 - \Omega_6^2)$$

Si noti che questa equazione non dipende solo dalla definizione della rotazione di imbardata, ma anche da quali rotori ruotano in senso orario e quali in senso antiorario. Un rotore che gira in senso orario produrrà sempre una rotazione di imbardata in senso antiorario.

Effetto giroscopico dell'elica La rotazione dell'elica produce l'effetto giroscopico seguente

$$\tau_{gyro} = \begin{bmatrix} -J_r \dot{\theta} \Omega_r \\ J_r \dot{\phi} \Omega_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dove $J_r [Nms^2]$ è l'inerzia rotazionale dell'elica e $\Omega_r = -\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4 - \Omega_5 + \Omega_6 [rad/s]$ è la velocità complessiva.

Coppia di imbardata opposta La differente accelerazione rotazionale delle eliche produce una coppia di imbardata di verso opposto, pari a

$$\tau_{contr} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ J_r \dot{\Omega}_r \end{bmatrix}$$

Dove $J_r [Nms^2]$ è l'inerzia rotazionale dell'elica e $\Omega_r = -\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2 - \Omega_5^2 + \Omega_6^2 [rad/s]$ è la velocità complessiva.

Sistema di equazioni finali

Riassumendo le espressioni derivate nelle sezioni precedenti, le equazioni finali del moto sono elencate nell'equazione successiva, viene riportata anche la relazione con la velocità dell'elica nella seconda equazione.

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} rv - qw & +g \sin \theta & -\frac{\mu}{m} u & 0 & -\frac{1}{2m} C A_x \rho u |u| \\ pw - ru & -g \cos \theta \sin \phi & -\frac{\mu}{m} v & 0 & -\frac{1}{2m} C A_y \rho v |v| \\ qu - pv & -g \cos \theta \cos \phi & 0 & +\frac{1}{m} F_{thrust} & -\frac{1}{2m} C A_z \rho w |w| \\ \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} qr & +\frac{1}{I_{xx}} \tau_{rollio} & -\frac{1}{I_{xx}} J_r \dot{\theta} \Omega_r & 0 & \\ \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} pr & +\frac{1}{I_{yy}} \tau_{beccheggio} & +\frac{1}{I_{yy}} J_r \dot{\phi} \Omega_r & 0 & \\ \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} pq & +\frac{1}{I_{zz}} \tau_{imbardata} & 0 & -\frac{1}{I_{zz}} J_r \Omega_r & \end{bmatrix} \\ \begin{cases} F_{thrust} = b \sum_{i=1}^6 \Omega_i^2 \\ \tau_{rollio} = bl \left(-\Omega_3^2 + \Omega_6^2 + \frac{1}{2} (-\Omega_2^2 - \Omega_4^2 + \Omega_5^2 + \Omega_1^2) \right) \\ \tau_{beccheggio} = bl \frac{\sqrt{3}}{2} (-\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_5^2 + \Omega_4^2) \\ \tau_{imbardata} = d(+\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2 + \Omega_5^2 - \Omega_6^2) \\ \Omega_r = -\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4 - \Omega_5 + \Omega_6 \end{cases} \end{cases}$$

3.3.3 Equazioni del moto semplificate

In questa sezione la coppia risultante dall'azione dell'attuatore è predominante rispetto al resto.

Il movimento dell'esacottero dipende principalmente dalla gravità e dalla spinta dei rotori, dalla resistenza del rotore e anche l'attrito dell'aria gioca un ruolo nel sistema e questo rende il modello matematico dell'esacottero più complesso come si è visto al capitolo 3.3.2. Inoltre, l'aerodinamica dell'esacottero è influenzata da vari parametri che sono stati precedentemente considerati, tra cui la rotazione dell'elica, l'accelerazione dell'elica dovuta ai cambiamenti di velocità (che porta a una coppia aggiuntiva) e l'effetto giroscopico causato dai cambiamenti di direzione dell'esacottero.

Considerando che il progetto dell'APR in questione è un sistema con un corpo rigido, ha una struttura simmetrica e non vola ad elevate velocità (massimo $5m/s$) e utilizzando la formula di Newton-Eulero, il modello dinamico dell'elicottero può essere semplificato. I parametri che influenzano il sistema, ma che vengono considerati nulli sono: resistenza del rotore, resistenza dell'aria, effetto giroscopico dell'elica e coppia di imbardata opposta. Il risultato di questa semplificazione porta alle seguenti equazioni.

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} rv - qw & +g \sin \theta & 0 \\ pw - ru & -g \cos \theta \sin \phi & 0 \\ qu - pv & -g \cos \theta \cos \phi & +\frac{1}{m} F_{thrust} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I_{yy}-I_{zz}}{I_{xx}} qr & +\frac{1}{I_{xx}} \tau_{rollio} \\ \frac{I_{zz}-I_{xx}}{I_{yy}} pr & +\frac{1}{I_{yy}} \tau_{beccheggio} \\ \frac{I_{xx}-I_{yy}}{I_{zz}} pq & +\frac{1}{I_{zz}} \tau_{imbardata} \end{bmatrix} \end{cases}$$

$$\begin{cases} F_{thrust} = b \sum_{i=1}^6 \Omega_i^2 \\ \tau_{rollio} = bl \left(-\Omega_3^2 + \Omega_6^2 + \frac{1}{2}(-\Omega_2^2 - \Omega_4^2 + \Omega_5^2 + \Omega_1^2) \right) \\ \tau_{beccheggio} = bl \frac{\sqrt{3}}{2} (-\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_5^2 + \Omega_4^2) \\ \tau_{imbardata} = d(+\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2 + \Omega_5^2 - \Omega_6^2) \\ \Omega_r = -\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4 - \Omega_5 + \Omega_6 \end{cases}$$

3.3.4 Sistema di controllo dell'APR

Sulla base delle equazioni viste nelle sezioni precedenti, si nota che l'input del modello è dato dalle velocità di rotazione dei rotori, mentre l'output è caratterizzato dall'angolo di assetto dell'elicottero: il rollio, il beccheggio, l'imbardata e l'altitudine.

In realtà il pilota non comanda direttamente la velocità di rotazione dei motori, ma gli angoli di assetto. Per dimostrarlo in modo più dettagliato, il sistema di controllo del movimento dell'elicottero può essere rappresentato in uno schema a blocchi come mostrato nella figura 3.12.

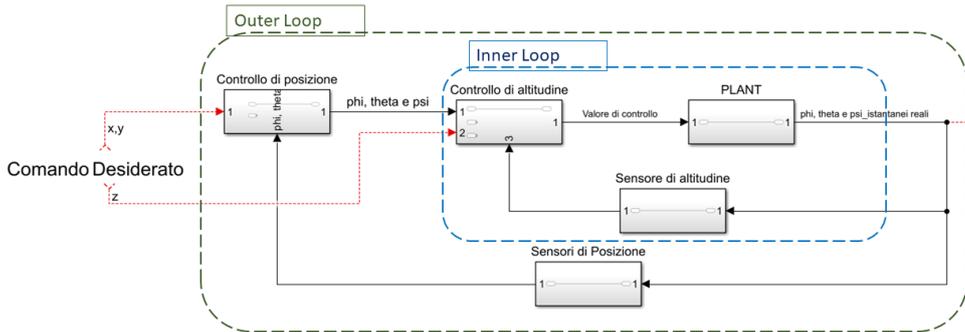


Figura 3.12: Flowchart del sistema di controllo dell'APR

Come si può vedere, il sistema di controllo dell'altitudine, che agisce per controllare il rollio (ϕ), il beccheggio (θ) e l'imbardata (ψ) dell'elicottero, deve essere uguale al riferimento di ingresso, questo è noto come "ciclo di controllo interno" (inner-loop). Il controllo di posizione, invece, è il

controllo del movimento nel piano verticale all'asse z (controllo di altitudine) e quindi del piano passante per gli assi x e y ed è chiamato "anello di controllo esterno" (outer-loop).

Come regola comune in letteratura [12], il sistema di controllo di un multirottore è suddiviso in due parti: un controllo di riferimento (outer-loop), che tiene conto della posizione da raggiungere, espressa in termini di waypoint e un controllore di altitudine (inner-loop) che utilizza i comandi fornendo in uscita la velocità dei motori Ω_i (con i compreso tra 1 e il numero di eliche). Esistono molti approcci per effettuare il controllo, i controllori PID (Proportional Integral Derivative) classici e più semplici possono portare grandi vantaggi per un modello anche dettagliato.

PID

Un controllore proporzionale-integrale-derivato (PID) viene utilizzato in molte applicazioni che richiedono un controllo modulato continuo. Il sistema permette di calcolare un valore di errore ($e(t)$) come la differenza tra il setpoint desiderato e la variabile di processo misurata e aggiunge o rimuove le correzioni in base a termini proporzionali, integrali e derivati.

Il primo utilizzo di questi sistemi è stata un'applicazione nei sistemi di controllo automatico per le navi, successivamente si è utilizzata nell'industria manifatturiera prima implementata nel controllo pneumatico e poi in quello elettronico. Oggi il controllo PID viene utilizzato in tutte le applicazioni che richiedono un controllo automatico accurato e ottimizzato. Il diagramma in figura 3.13 mostra i principi di come vengono generati e applicati i termini proporzionali, integrali e derivati. Il controllore calcola continuamente il valore di errore ($e(t)$) come differenza e applica la correzione, questo porta a ridurre l'errore nel tempo, regolando il controllo ($u(t)$) [22].

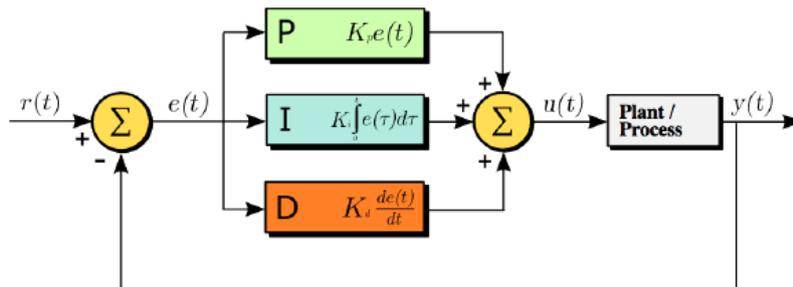


Figura 3.13: Schema di funzionamento sistema PID [22]

In questo modello i termini hanno il seguente significato:

- **Termine P:** questo termine è proporzionale al valore corrente. Se l'errore è grande e positivo, l'uscita sarà proporzionalmente grande e positiva, considerando il fattore di guadagno K_P . L'utilizzo del solo controllo proporzionale in un processo compensato causerà un errore tra il setpoint e il valore di processo effettivo, poiché richiede un errore per generare la risposta proporzionale. Senza un errore non c'è risposta correttiva.
- **Termine I:** questo termine tiene conto dei valori passati e li integra nel tempo per produrre il termine I . Dopo l'applicazione del controllo proporzionale, se c'è un errore residuo, il termine integrale ha lo scopo di eliminarlo aggiungendo un effetto di controllo dovuto al valore cumulativo storico dell'errore e , quando l'errore viene rimosso, il termine integrale cesserà di crescere. Questo comporterà una riduzione dell'effetto proporzionale quando l'errore diminuisce, ma questo è compensato dall'aumento dell'effetto integrale. item **Termine D:** a volte viene chiamato "controllo anticipatorio". Questo termine è una stima dell'andamento futuro dell'errore, basato sul suo attuale tasso di variazione (derivata). L'effetto del controllo o dello smorzamento è maggiore se ci sono cambiamenti più rapidi.

3.4 Sistema di distribuzione

In questa sezione si finalizza la scelta del sistema che realizza la distribuzione vera e propria del prodotto, questo possiede un ruolo importante all'interno del progetto e in seguito si analizzano varie soluzioni in merito. Un solo trattamento sbagliato durante tutta la stagione può avere effetti disastrosi sull'entità e sulla qualità della produzione; quindi, è necessario concentrare molte energie a riguardo.

Il sistema che si può trasportare a bordo dell'APR è soggetto a stringenti limiti di peso e dimensioni, conseguentemente anche di energia e potenza, in quanto la fonte energetica è rappresentata dalle batterie elettriche che quindi dovranno aumentare la loro quantità di energia in funzione di quanta ne viene richiesta dal sistema di distribuzione. Si è scelto di utilizzare un sistema di distribuzione a polverizzazione meccanica e non pneumatica perché ha la caratteristica di funzionare senza necessità di grossa componentistica (la polverizzazione pneumatica richiede alte velocità al flusso, difficilmente raggiungibili con sistemi trasportabili sull'APR). Oltre a questo, la tecnologia a polverizzazione meccanica è robusta e la componentistica è fortemente presente in commercio.

Per soddisfare i requisiti esplicitati, la sola forza del sistema di polverizzazione (ugello) non riesce a soddisfare un'adeguata irrorazione nel vigneto, soprattutto per la copertura in profondità dei punti interni poco esposti. Come già fatto presente alla sezione 2.2.4, per soddisfare questa esigenza, occorre utilizzare una forma di aero assistenza in grado di trasportare le gocce sulla pianta. A proposito di flussi aerodinamici è necessario prendere in considerazione anche l'effetto downwash dei rotori, nelle soluzioni che si analizzano in seguito si fa presente come questo possa essere un effetto positivo o negativo.

In questa sezione si analizzano varie soluzioni, è importante però notare anticipatamente alcune caratteristiche comuni, queste ci permettono di definire il circuito idraulico. Va ricordato che il sistema deve garantire una distribuzione di gocce abbastanza fini, queste si possono ottenere da un sistema di distribuzione del prodotto fitosanitario costituito da ugelli che nebulizzano il liquido. Il numero degli ugelli più è elevato e più è accurata la distribuzione, come si era inizialmente pensato, 10 ugelli sono un buon compromesso (prevedendo di passare con l'APR sopra il filare sono 5 ugelli per lato). Per la distribuzione del prodotto è necessario che il liquido entri negli ugelli con una determinata pressione. Per definire quindi il miglior circuito idraulico si fa una scelta dei componenti, in particolare per l'interesse di questa tesi si analizzano gli ugelli e due possibili sistemi di pressione del circuito.

3.4.1 Scelta ugello

Per la scelta del modello di ugello si fa riferimento ai requisiti del sistema e quindi alla necessità di diminuire la deriva del prodotto. Per soddisfare questa esigenza si pensa di usare ugelli specifici presenti in commercio chiamati "ugelli antideriva": A differenza degli ugelli tradizionali, quelli antideriva producono delle goccioline omogenee, che contengono delle microsferiche di aria e che fanno sì che la goccia 'esploda' al contatto con la foglia, aumentando la superficie di copertura [4]. Per il dimensionamento si utilizzano le tabelle che riportano la portata in funzione di parametri del sistema. L'ugello che si decide di utilizzare è il modello *ALBUZ AVI 110*, il funzionamento viene riportato in figura 3.14.

Il modello che si sceglie per l'ugello specifica la tecnologia che esso possiede, va inoltre tenuto in considerazione il colore che ne definisce la portata seguendo le norme ISO. Si cerca quindi il colore dell'ugello ottimale per il sistema in questione.

L'APR in questione è caratterizzato da una bassa velocità di avanzamento nella fase di distribuzione del prodotto ($1m/s$). Avendo questa velocità e un quantitativo di ugelli pari a dieci, la portata del sistema di prodotto distribuito è pari a:

$$Portata_{fito} = \frac{Liquido_{distribuito}}{Tempo_{distribuzione}} = \frac{25l}{500s} = 0.05l/s = 3l/min$$

$$Tempo_{distribuzione} = \frac{Distanza}{Velocita'} = 500s$$

Secondo i risultati riportati, il colore dell'ugello migliore per soddisfare questa necessità è l'arancione. Oltretutto la pressione che rispecchia le esigenze di portata è $2bar$, questa è facilmen-

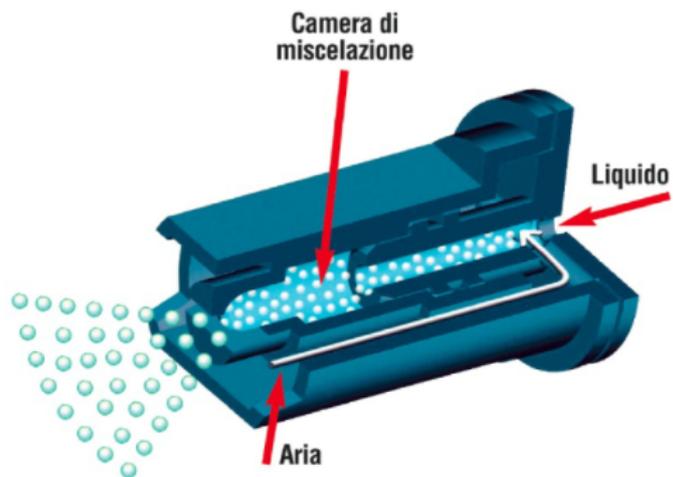


Figura 3.14: Funzionamento ugello antideriva

FILTRO	COME SI ORDINA	bar	l/min
100 MESH	228.1801.10 (11001) ARANCIO	2	0.33
		3	0.40
		4	0.46
		5	0.52
		7	0.81
100 MESH	228.1801.41 (11015) VERDE	2	0.49
		3	0.60
		4	0.69
		5	0.77
		7	0.92
80 MESH	228.1801.42 (11002) GIALLO	2	0.65
		3	0.80
		4	0.92
		5	1.03
		7	1.22
80 MESH	228.1801.43 (110025) LILLA	2	0.82
		3	1.00
		4	1.15
		5	1.29
		7	1.53
50 MESH	228.1801.44 (11003) BLU	2	0.98
		3	1.20
		4	1.39
		5	1.55
		7	1.83
FILTRO	COME SI ORDINA	bar	l/min
50 MESH	228.1801.45 (11004) ROSSO	2	1.31
		3	1.60
		4	1.85
		5	2.07
		7	2.44
50 MESH	228.1801.46 (11005) MARRONE	2	1.63
		3	2.00
		4	2.31
		5	2.58
		7	3.06
50 MESH	228.1801.47 (11006) GRIGIO	2	1.98
		3	2.40
		4	2.77
		5	3.10
		7	3.67
30 MESH	228.1801.8 (11008) BIANCO	2	2.61
		3	3.20
		4	3.70
		5	4.13
		7	4.89
30 MESH	228.1801.11 (11010) NERO	2	3.27
		3	4.00
		4	4.62
		5	5.16
		7	6.11

(a)

(b)

Figura 3.15: Tabella scelta ugelli [4]

te ottenibile. L'ugello che viene utilizzato nel sistema viene approssimato su CAD, è possibile osservare in figura 3.16-a l'ugello reale e in figura 3.16-b l'ugello approssimato.

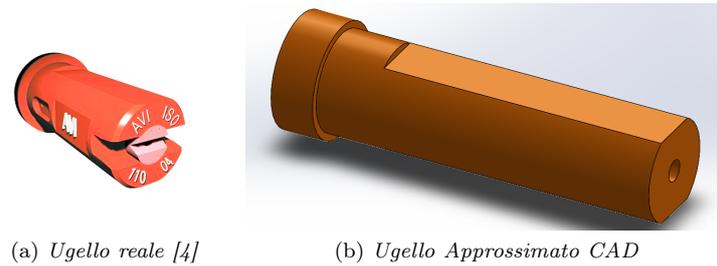


Figura 3.16: Ugello ALBUZ AVI 110 arancione

3.4.2 Circuito Idraulico

In questa sezione si analizzano due modi per mettere in pressione il sistema, il primo è accelerando il fluido attraverso una pompa mentre il secondo è aumentare la pressione del sistema attraverso un compressore. L'obiettivo finale è lo stesso, ma i sistemi sono diversi. Le due ipotesi di sistema vengono riportate in figura 3.17.

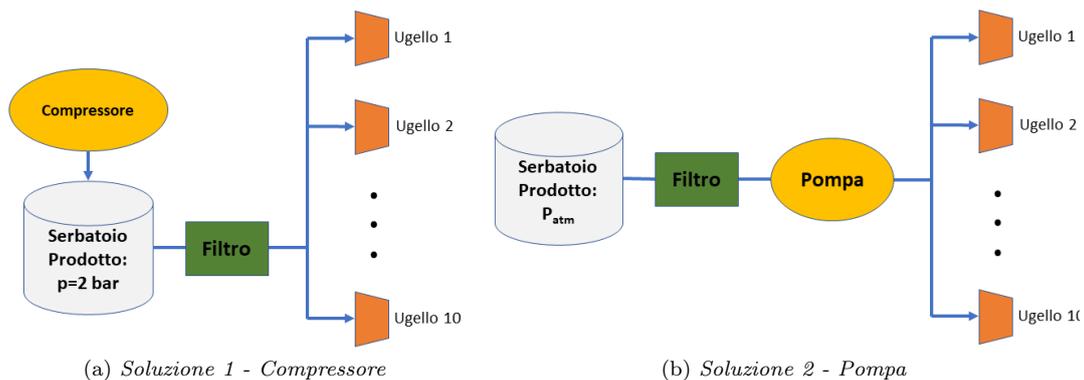


Figura 3.17: Soluzioni circuito idraulico

- **Sistema a compressore:** questo è caratterizzato da un serbatoio pressurizzato e da un compressore che ne mantiene la pressurizzazione, a mano a mano che a quest'ultimo viene prelevato il liquido. Il sistema ha la caratteristica particolare di possedere una pressurizzazione effettuabile a terra che aumenta la pressione del serbatoio precaricato. Tuttavia, riporta altri problemi: il peso è superiore, il surriscaldamento del compressore, la complicata progettazione del serbatoio pressurizzato, il difficile sistema di collegamento e la regolazione del flusso con gli ugelli. Essendo difficile trovare un compressore leggero si esclude la possibilità di implementazione di questo circuito, anche se sarebbe interessante approfondire l'argomento per poter essere certi che il circuito migliore sia quello a pompa.
- **Sistema a pompa:** questo è caratterizzato da un sistema dove il serbatoio non viene pressurizzato e la pompa svolge il compito di prelevare il prodotto fitosanitario dal serbatoio e portarlo agli ugelli. Come pompa si sceglie il modello RLFP122202A della marca Flojet, una pompa autoaspirante a basso consumo energetico con il pressostato presente già all'interno [1]. La pompa ha le dimensioni di $100\text{mm} \times 162\text{mm} \times 61\text{mm}$, il peso di 0.6kg , una portata di 3.8l/min e una pressione di esercizio di 2.4bar .

Le caratteristiche che possiede sono ottime per le necessità che si hanno. Oltre a questo, come riporta il flusso in figura 3.17 sarà necessario inserire un filtro grossolano per evitare che la pompa si danneggi.

In tabella 3.11 vengono riportati i dati essenziali della pompa presa per il circuito, in figura 3.18-a si ha la foto della pompa reale e in figura 3.18-b si ha l'approssimazione CAD.

Grandezza	Misura
Peso [kg]	0.6
Larghezza [mm]	100
Profondità [mm]	162
Altezza [mm]	61
Tensione [V]	12
Consumo [A]	1.8

Tabella 3.11: Caratteristiche geometriche pompa

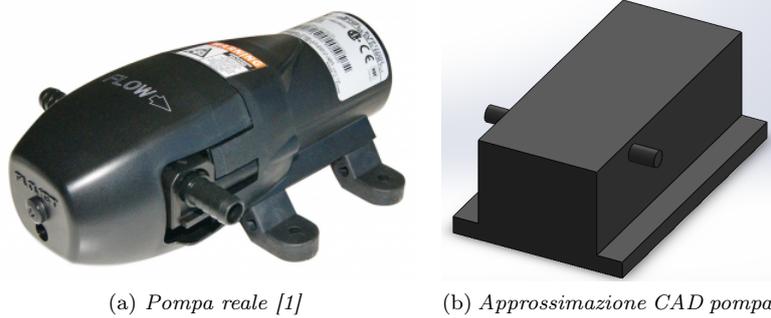


Figura 3.18: Pompa Flojet

Ora è necessario predisporre gli ugelli trovando il compromesso migliore. Di seguito si analizzano tre soluzioni, la prima è stata analizzata al capitolo 2 nella sezione 2.2.4. La seconda e la terza si vedranno in seguito analizzando pregi e difetti.

3.4.3 Predisposizione ugelli soluzione 1

Questa soluzione prevede il posizionamento di 10 motori elettrici con l'elica accostati ai 10 ugelli, questo per creare un flusso d'aria con lo scopo di far arrivare il prodotto alla pianta.

Si sceglie di utilizzare il motore della T-Motor modello Antigravity MN4004 KV400, questo ha la caratteristica di essere leggero e con l'elica $P13x4.4CF$ può generare una spinta di $1067g$ all'85% della manetta (vedi componenti nella figura 3.19).

I tre componenti visti in figura hanno una massa complessiva di $93g$ ($14.2g + 53g + 26g$) e ogni motore all'85% della manetta consuma $\approx 150W$ [8]. È necessario pensare a un sistema per collegare l'asta al motore e all'ugello, questo è riportato nella figura 3.20, che riprende un particolare del sistema complessivo. Si può notare in blu il sistema di collegamento, in arancione l'ugello, in grigio chiaro il motore e in trama di fibra di carbonio l'elica.

La disposizione dei componenti è stata pensata posizionando il motore all'esterno con l'elica che crea un flusso d'aria che punta all'interno del vigneto. Nello schema va ricordato che manca L'ESC, i cavi elettrici e il tubo idraulico che porta il fluido all'ugello, questi dovranno essere posizionati o all'interno del tubo o legati saldamente allo stesso.

In figura 3.21 si osserva la visione d'insieme del modello di distribuzione del sistema 1, il cilindro in blu è per ora l'approssimazione di un contenitore di sistemi non specificati (ad esempio, il serbatoio, la pompa, ecc). Nella figura 3.21-a si riporta nell'insieme anche il sistema di potenza dell'APR (Motore, elica, ESC, batteria e controllore di volo).

Vantaggi e svantaggi

Questo sistema ha il grosso vantaggio di avvolgere bene la pianta con le due braccia (modellizzate di colore verde nella figura 3.21). Queste due braccia hanno però un problema intrinseco, dovuto a



Figura 3.19: Sistema ventilazione soluzione 1

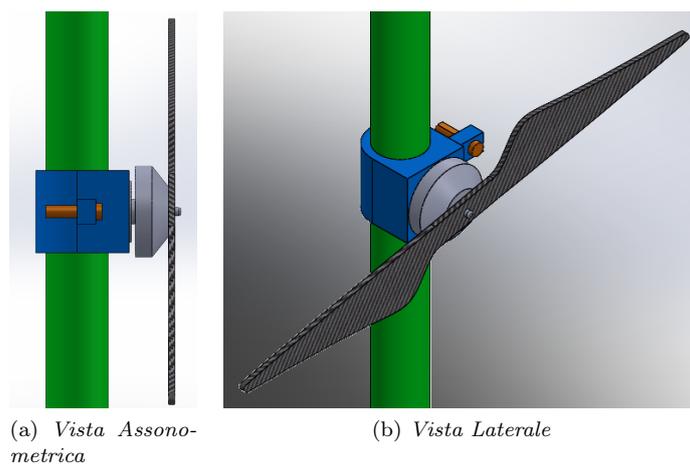


Figura 3.20: Particolare sistema di distribuzione 1

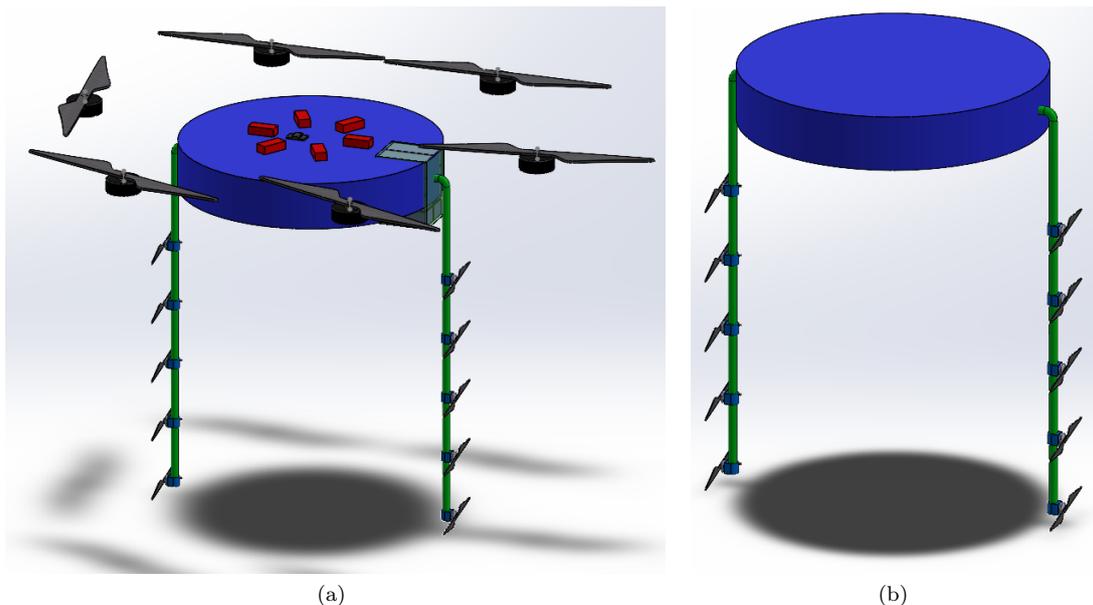


Figura 3.21: Sistema di distribuzione 1

tre fattori principali: il primo è il problema nel momento di atterraggio (le braccia non funzionano da cavalletto e interferiscono con esso); il secondo legato alla sicurezza del volo (il sistema potrebbe essere soggetto a un eventuale incastrò di vegetazione) e il terzo legato alla manovrabilità (difficoltà di manovrare il sistema in modo perfettamente lineare sul filare). Un ulteriore problema è legato al downwash delle pale dei motori installati per la creazione di spinta per il volo. Il downwash potrebbe spingere verso il basso il flusso dei 10 motori portando a una perdita di prodotto che viene trascinato verso terra. Il problema del downwash, nel caso dovesse portare a una perdita eccessiva di prodotto, si potrebbe risolvere progettando una lamiera che isoli il flusso di distribuzione da quello di potenza dei 6 motori posti sopra.

Un ulteriore dettaglio che viene annoverato tra gli svantaggi è il consumo, questo non è trascurabile richiedendo una potenza di $1500W$ (ogni motore consuma $150W$). Anche il costo non è trascurabile: ogni motore costa $145.90\$ \approx 132,61\text{euro}$, senza considerare l'elica e l'ESC.

I vantaggi sono legati a un'ottima distribuzione di prodotto, un peso mediamente contenuto del sistema (circa 1 kg per i 10 motori+eliche+ESC) e $\approx 668g$ il peso del tubo in fibra di carbonio, su cui si allacciano i motori.

3.4.4 Predisposizione ugelli soluzione 2

La soluzione 2 è quella implementata dagli APR in commercio visti alla sezione 1.2.1. Questi prevedono un sistema di distribuzione con ugelli in posizione sottostante al motore che crea il sostentamento dell'APR, in modo da sfruttare il downwash come vettore di distribuzione del prodotto fitosanitario. Questo sistema ha la caratteristica, rispetto a quelli in commercio, di cercare di penetrare l'apparato fogliare superficiale con ugelli posti lateralmente e non al centro del sistema dell'APR. Per soddisfare al meglio questa esigenza si è pensato a un sistema con due braccia a 5 ugelli l'uno, il braccio viene riportato in figura 3.22, dove è possibile notare il principio di funzionamento.

In figura 3.23 invece si osserva la visione d'insieme del modello di distribuzione del sistema 2, il cilindro in blu è per ora l'approssimazione di un contenitore di sistemi non specificati (ad esempio, il serbatoio, la pompa, ecc). Nella figura 3.23-a si riporta nell'insieme anche il sistema di potenza dell'APR (Motore, elica, ESC, batteria e controllore di volo).

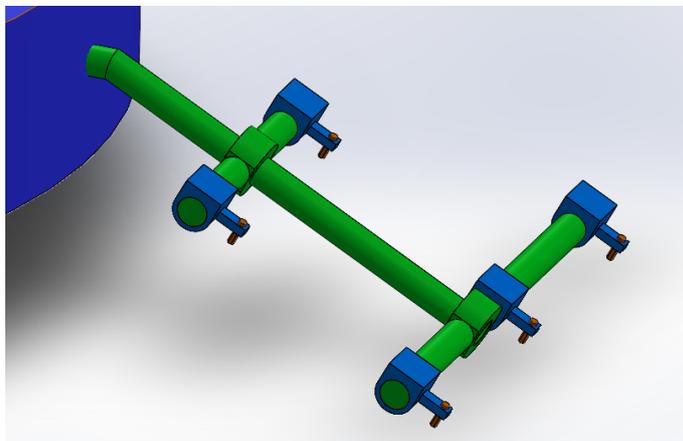
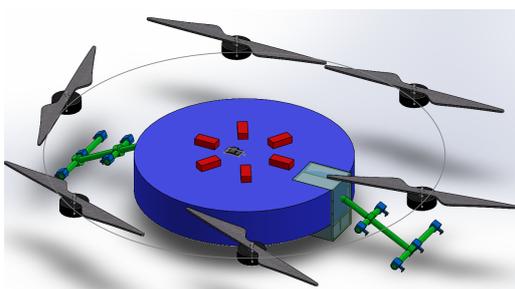
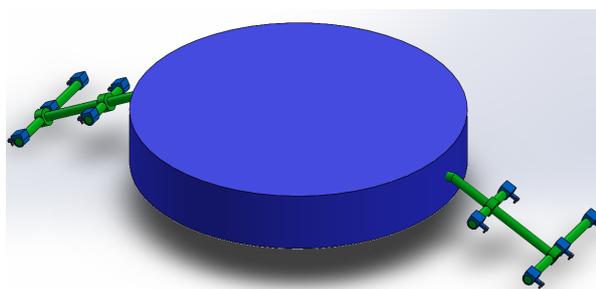


Figura 3.22: Particolare Sistema 2



(a)



(b)

Figura 3.23: Sistema di distribuzione 2

Vantaggi e svantaggi

I vantaggi di questo sistema sono: strutturali, legati alla guida e controllo del velivolo e al peso. Il peso di questo sistema è veramente ridotto, si arriva considerando il peso degli ugelli e porta ugelli intorno ai 200 g (20g per 10 ugelli) e della barra porta ugelli intorno a 300 g. Sostanzialmente si riduce il peso di tutti i motori del sistema 1.

Gli svantaggi sono evidenti, si va a perdere la distribuzione puntuale del prodotto, (dettaglio non trascurabile) avendo come requisito di progetto un sistema di distribuzione con bassa deriva del prodotto fitosanitario.

3.4.5 Predisposizione ugelli soluzione 3

Questa soluzione prevede il posizionamento di un compressore centrifugo per la creazione di un flusso d'aria da portare assialmente agli ugelli disposti paralleli alla pianta. Il sistema avrà caratteristiche simili alla soluzione 1, ma con la grossa differenza di avere il flusso d'aria creato da un compressore centrifugo e non da 10 motori elettrici con elica.

Per partire con l'analisi del sistema è necessario trovare un compressore idoneo al compito da svolgere e dopo varie ricerche si è scelto quello che è il miglior compromesso tra peso, portata e consumo. I sistemi in commercio sono principalmente per uso terrestre e quindi alimentati con una tensione a corrente alternata a 220V. Nel caso ci fossero solo soluzioni a corrente alternata basterebbe porre in serie al compressore un inverter per portare la corrente continua delle batterie ad alternata. Questo però non è necessario visto che si è trovato un compressore con ottime caratteristiche.

Il compressore centrifugo scelto è prodotto dalla Sanyo Denki e il numero del modello è 9TP48P0G001 [2], questo ha la caratteristica di essere leggero (1050g), consuma relativamente poco (132W) e genera un flusso d'aria di $742CFM \approx 1260m^3/h$ (vedi figura 3.24). Oltre a queste caratteristiche va fatto presente che è alimentato da una corrente continua di 50 V e ha un costo di 238 Euro. Nel CAD del compressore è stata assegnata una densità per raggiungere il peso del corpo ed è stato assegnato come colore l'arancione chiaro per identificare successivamente il componente nell'assieme in modo diretto. Nel CAD è stato disegnato il compressore con il diffuser (viene considerato un peso del diffuser di 100g, questo è approssimato e va analizzato sicuramente più nel dettaglio per migliorare l'efficienza dello stesso).

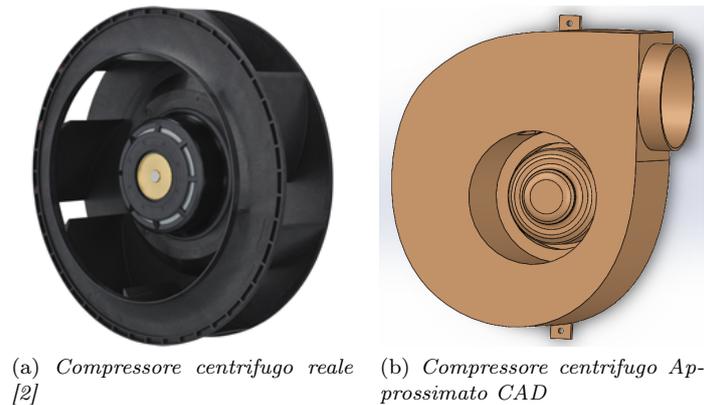


Figura 3.24: Compressore Centrifugo

E' necessario progettare un sistema che veicoli il flusso d'aria in uscita dal compressore all'ugello che distribuisce il prodotto. Il canale di distribuzione è stato disegnato con due parti che successivamente andranno assemblate, queste vengono riportate in figura 3.25, che riprende un particolare del sistema complessivo. Va fatto presente che, sia il raccordo 1, sia il raccordo 2, sono estrusioni a parete sottile con uno spessore di 2.5 mm.

Il raccordo 1 (in figura 3.25-a) rappresenta il componente che permette la connessione tra l'uscita del compressore e l'entrata del raccordo 2. Nella prima parte del componente si ha un'estrusione con loft, questa permette di portare la sezione di uscita del compressore da sezione circolare a

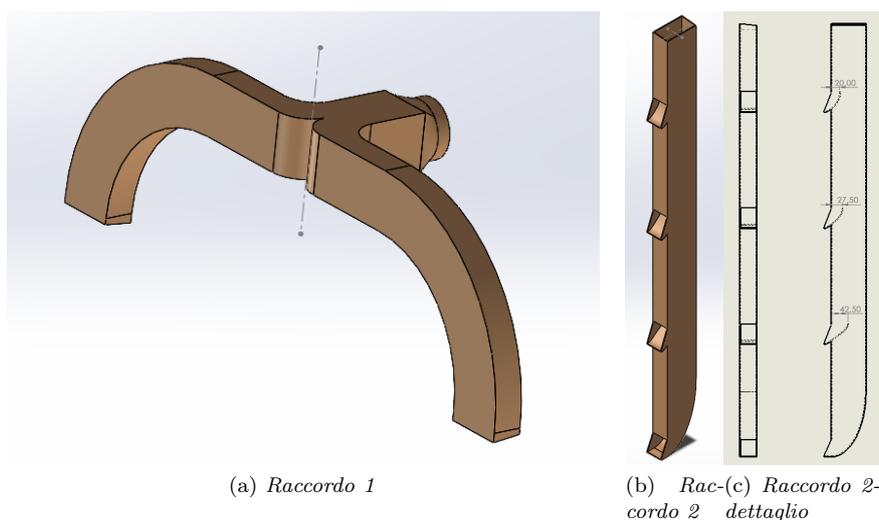


Figura 3.25: Particolare sistema di distribuzione 3

quadrata. Il compressore alimenta entrambi i bracci, è necessario quindi dividere il flusso con una biforcazione, questo viene fatto progettando due bracci che dividono in due la sezione quadrata iniziale. Dopo la biforcazione si ha un'estrusione con sweep che permette di cambiare direzione al flusso di 90° verso il basso. Nell'ultima parte è stata aggiunta una piccola estrusione per permettere il movimento di chiusura del raccordo 2 quando non svolge il compito di distribuzione.

Il raccordo 2, in figura 3.25-b, è il braccio su cui vengono posizionati gli ugelli, ha un'altezza di $\approx 1200\text{mm}$ e quattro uscite che permettono al flusso generato dal compressore di uscire. Essendoci il rischio di suddivisione del flusso d'aria nelle quattro bocche in modo sproporzionato, si è pensato di prelevare proporzionalmente parte del flusso nelle prime tre uscite. Per analizzare questo sezionamento si veda la figura 3.25-c, in particolare va notata la differente sezione di imbocco per le uscite del flusso: nella prima bocca l'area di ingresso del flusso è un quarto rispetto al totale ($900\text{mm}/4 = 225\text{mm}$); nella seconda è un terzo ($900\text{mm}/3 = 300\text{mm}$) e nella terza la metà ($900\text{mm}/2 = 450\text{mm}$). Questo dovrebbe portare, ipotizzando che l'attrito sia trascurabile, una portata di aria uguale per le quattro bocche del raccordo e quindi una velocità di uscita pari.

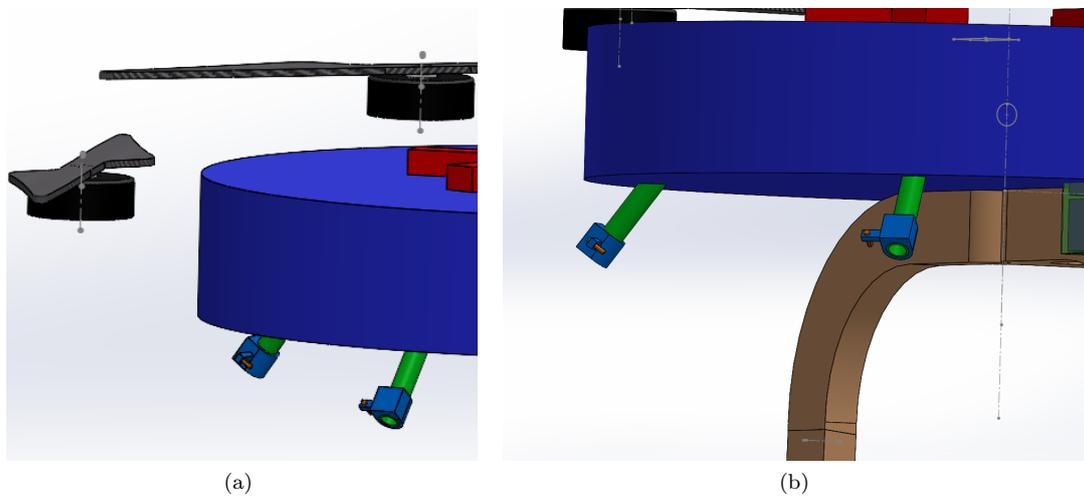
In particolare, per questo sistema si è deciso di posizionare due ugelli nella parte alta. I due ugelli vengono posizionati nella parte anteriore dell'APR di modo da riuscire a irrorare la cima della pianta, questi ugelli sfruttano in particolare il flusso di downwash dei due motori che sono posizionati nella parte anteriore. Si veda il dettaglio in figura 3.26.

Il peso delle braccia si calcola attraverso il programma Solidworks, in particolare viene definita la densità del materiale ABS. Essendo l'ABS una plastica non particolarmente leggera ($1020\text{kg}/\text{m}^3$) ma resistente ($\text{Moduloelastico} = 2000\text{N}/\text{mm}^2$), si decide di utilizzare uno spessore della parete pari a 1mm al posto dei 2.5mm viste le sezioni in gioco si prevede uno spessore della parete sottile di 1mm e non di ipotizzati inizialmente. In particolare viene misurata una massa di 407.32g per il raccordo 1 e di 333.88g per il raccordo 2; in totale il peso dei raccordi è di 1075g .

In figura 3.27 si osserva la visione d'insieme del modello di distribuzione del sistema 3, il cilindro in blu è per ora l'approssimazione di un contenitore di sistemi non specificati (ad esempio, il serbatoio, la pompa, ecc). Nella figura 3.27-a si riporta nell'insieme anche il sistema di potenza dell'APR (Motore, elica, ESC, batteria e controllore di volo).

Confronto velocità fra flusso d'aria e downwash eliche - TDA

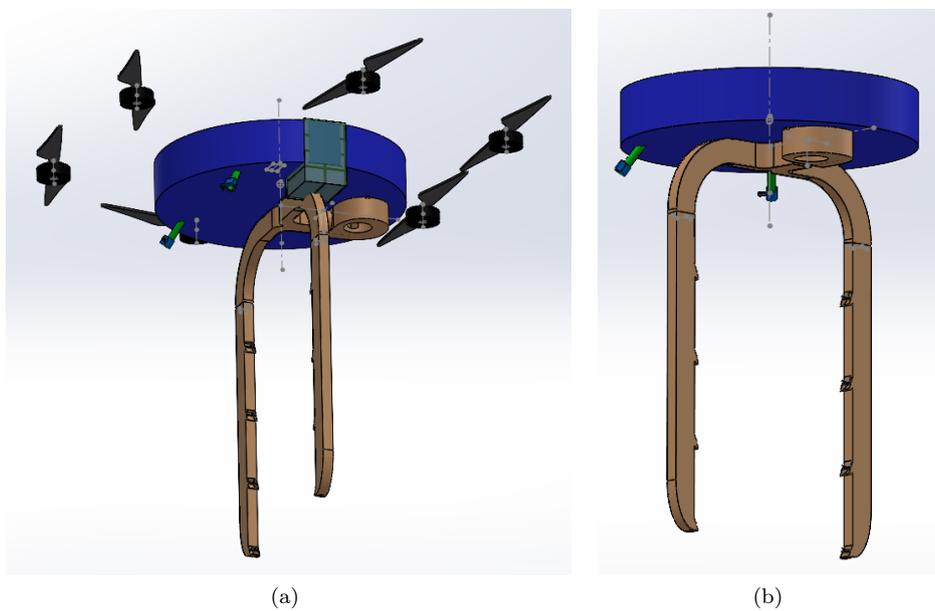
Per concludere l'analisi del sistema è necessario verificare che il compressore riesca a generare un flusso d'aria sufficiente al prodotto per arrivare alla pianta con una certa velocità. Con questo obiettivo si confrontano le velocità di fuoriuscita del flusso d'aria generato dal compressore con la velocità di downwash dell'APR. Va fatto presente che i calcoli sono approssimativi e che per



(a)

(b)

Figura 3.26: Particolare sistema di distribuzione 3 - bis



(a)

(b)

Figura 3.27: Sistema di distribuzione 3

effettuare un conto più veritiero è necessario procedere ad un'analisi fluidodinamica computazionale (CFD).

La velocità di fuoriuscita dalle bocche del raccordo si calcola conoscendo la portata e l'area. La portata generata dal compressore è pari a $1260m^3/h \approx 350dm^3/s$, considerando 8 ugelli per bocca si ha una uscita di aria di $43.75dm^3/s$. L'area perpendicolare alla velocità di uscita è pari a $45mm * 42.5mm = 0.19dm^2$. Nella formula seguente si effettua il calcolo della velocità.

$$V_{uscita} = \frac{Q}{A} = \frac{43.75dm^3/s}{0.19dm^2} = 230.26dm/s = 23m/s$$

Si decide di calcolare la velocità di downwash con la teoria del disco attuatore (TDA), figura 3.28 [15]. Il disco attuatore (teoria di Froude-Rankine) è un operatore fisico matematico definito da un'area circolare. In corrispondenza della sezione A l'aria si muove con velocità V . Per effetto

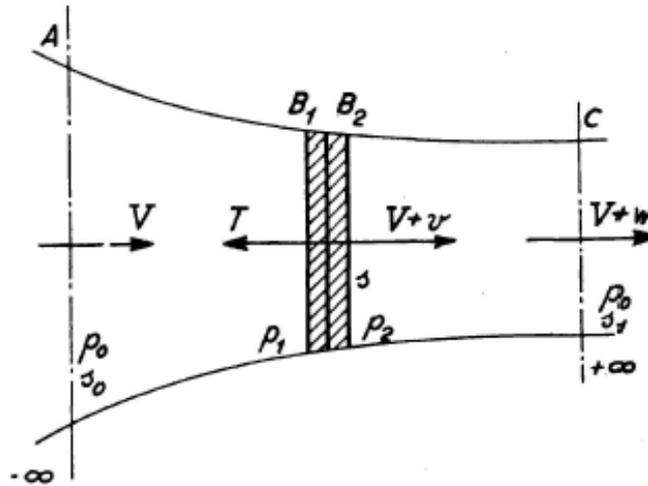


Figura 3.28: Teoria dell'Elemento di Pala

del gradiente di pressione ($p_0 - p_1$) l'aria accelera verso il disco secondo linee di corrente a pressione totale costante $P_t = P_0 + 1/2\rho V^2$ fino alla velocità ($V+v$) in corrispondenza della faccia B_1 del disco, dove con v si identifica la velocità indotta al disco (velocità di inflow). L'aria attraversa il disco (faccia B_2) conservando la velocità ($V+v$). Per effetto del salto di pressione al disco a questo punto continua ad accelerare secondo linee di corrente a pressione totale costante $P_t = P_2 + 1/2\rho(V+v)^2 = P_0 + 1/2\rho(V+w)^2$ fino alla velocità ($V+w$) in corrispondenza della sezione C , dove con w si identifica l'incremento totale di velocità (downwash). In figura, le due velocità $V_{+\infty}$ e $V_{-\infty}$ non sono poste all'infinito, ma a distanza pari a $4 \div 5$ diametri del rotore, considerando quest'ultimo sempre fuori dall'effetto suolo.

Considerando la condizione di hovering ($V = 0m/s$), la velocità indotta da un elica all'85% della manetta sarà così calcolata:

$$v = \sqrt{\frac{W}{2\rho_{sl}S}} = \sqrt{\frac{18.9 * 9.81}{2 * 1.225 * 0.7854}} = 9.81m/s$$

$$S = \pi R^2$$

Dove W è il peso del sistema (in questo caso si considerano i grammi forza generati dal motore+elica moltiplicati per l'accelerazione di gravità), ρ_{sl} la densità al livello del mare, S la superficie del disco rotore e R il raggio dell'elica.

La velocità di downwash w è pari al doppio della velocità indotta trovandoci in condizione di hovering, ed è quindi pari a:

$$w = 2 * v = 9.81m/s * 2 = 19.63m/s$$

Va fatto presente, per non cadere in errore, che la velocità di downwash la si raggiunge a una distanza dal disco rotore di 5 diametri dell'elica in condizione di OGE, (Out of Ground Effect), ed essendo con l'APR molto vicini al suolo si ha l'effetto suolo. Le superfici aerodinamiche, come l'ala di un aeroplano o il rotore di un elicottero, in prossimità del suolo migliorano le loro prestazioni in termini di potenza o trazione fornita, questo effetto prende il nome di effetto suolo. Per quanto riguarda il tubo di flusso di un'elica azionata da un motore, nelle condizioni di effetto suolo (IGE, In Ground Effect) viene meno l'ipotesi della TDA di tubo di flusso che si estende all'infinito e, dato che la velocità indotta v deve essere nulla al suolo, il suo valore in corrispondenza del disco rotore sarà minore rispetto al caso OGE.

Visto che i fattori in campo non sono pochi e difficili da analizzare solo analiticamente, si decide di prendere come valore di velocità che interferisce con il flusso di aria uscente dalla bocca del raccordo 2 quello della velocità indotta pari a $v = 9.81m/s$.

Facendo un triangolo di velocità tra la velocità di uscita del sistema di distribuzione e la velocità indotta del rotore, si può analizzare la velocità risultante in figura 3.29.

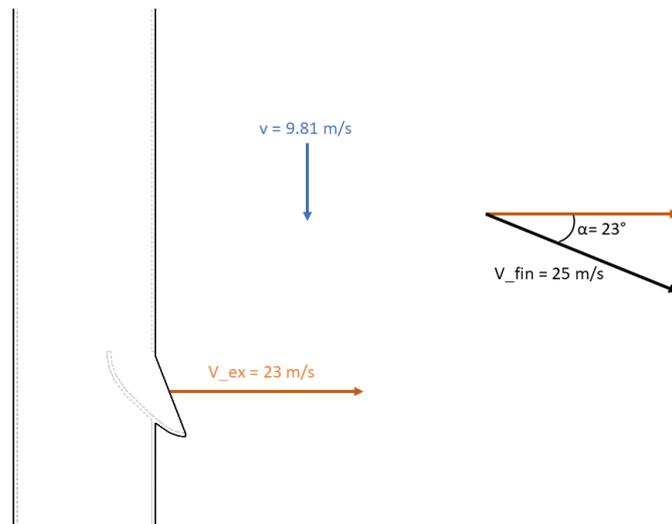


Figura 3.29: Triangolo di velocità

Il modulo e l'inclinazione della velocità del flusso in uscita sono pari a:

$$V_{finale} = \sqrt{(V_{uscita})^2 + v^2} = \sqrt{(23m/s)^2 + (9.81m/s)^2} = 25m/s$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{v}{V_{uscita}}\right) = 23^\circ$$

I valori di inclinazione che ottiene il flusso in uscita dalla bocca del raccordo 2 sono buoni. Se il flusso viene poi spinto con una leggera inclinazione verso il basso, si ottiene un ulteriore vantaggio. Se il braccio non fosse lungo abbastanza da riuscire a raggiungere la parte bassa del vigneto, l'inclinazione potrebbe sanare questa mancanza.

Si analizza anche il caso peggiore dal punto di vista di flusso derivante dal motore, ovvero quello con una velocità pari a quella di downwash ($w = 19.63m/s$). Questo porterebbe a un modulo e ad una inclinazione della velocità del flusso in uscita pari a:

$$V_{finale} = \sqrt{(V_{uscita})^2 + v^2} = \sqrt{(23m/s)^2 + (19.63m/s)^2} = 30.24m/s$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{v}{V_{uscita}}\right) = 40^\circ$$

Anche in questo caso l'angolo del flusso non crea un problema, sperando che non sia di natura vorticoso, poiché in questo caso, andrebbe analizzato con molto più dettaglio ed eventualmente andrebbe protetto il flusso d'aria, portando a non poche complicazioni.

Vantaggi e svantaggi

Questo sistema ha il grosso vantaggio di avvolgere bene la pianta con le due braccia modellizzate di colore marroncino. Queste due braccia hanno però un problema intrinseco, legato a tre fattori principali: il primo è il problema nel momento di atterraggio (le braccia non funzionano da cavalletto e interferiscono con esso), il secondo legato alla sicurezza del volo (il sistema potrebbe essere soggetto a un eventuale incastro di vegetazione) e il terzo legato alla manovrabilità (difficoltà di manovrare il sistema in modo perfettamente lineare sul filare). Questi tre fattori sono però molto meno problematici rispetto al sistema di distribuzione 1, le braccia non sono eccessivamente pesanti (333.88g l'una) e quindi si possono facilmente retrainare durante le fasi in cui non si distribuisce prodotto. La retrazione facilitata porta il sistema a non avere problemi legati alla guida e al controllo poiché basterà abbassare i bracci nella sola fase di distribuzione. Altro fattore importante è quello dell'incastro con la vegetazione, problema presente in questo sistema, ma limitato dal fatto che si può prevedere di far passare il tubo idraulico per l'ugello dentro lo stesso braccio.

Un problema evidente rispetto agli altri sistemi è il peso: circa 1050g il compressore centrifugo e circa 1000g dei raccordi.

I vantaggi sono legati a una buona distribuzione di prodotto, un costo contenuto del compressore ($\approx 240\text{euro}$) e l'uso della velocità dell'aria generata dalle pale per la distribuzione nella parte alta del filare.

3.4.6 Sistema di distribuzione scelto e implementato

Si sceglie il sistema 3 perché questo risulta il miglior compromesso tra i sistemi analizzati.

Il sistema 1 probabilmente è il migliore in termini di distribuzione di prodotto, esso ha un potente flusso d'aria creato dai motori che smuove le foglie permettendo una buona distribuzione, anche se il braccio ha le masse concentrate dei motori che sono lontane dal centro di massa che porta a un incremento del momento di inerzia del sistema. Un alto momento di inerzia porta non pochi problemi in termini di guida e controllo. Permane inoltre il problema della richiudibilità del sistema nel momento dell'atterraggio e del possibile incastro con la vegetazione durante la fase di distribuzione del prodotto.

Il sistema 2 ha il grossissimo vantaggio di essere leggero, maneggevole e poco costoso; questo però, come si è già visto, non riesce a soddisfare il requisito di generazione di poca deriva del prodotto fitosanitario. Questa può essere la soluzione per vegetazioni dove è sufficiente la distribuzione del prodotto fitosanitario nella parte vegetativa alta.

Il sistema 3 è un buon compromesso: le braccia sono facilmente richiudibili non avendo un grosso ingombro e non possedendo una massa tale da creare un momento di inerzia spiacevole per il controllo di volo. Lo scatolato permette inoltre di far passare al suo interno il circuito idraulico che porta liquido fitosanitario all'ugello evitando il problema di avere esposto all'esterno un possibile oggetto che si incastra con la vegetazione.

In figura 3.30 viene mostrato un possibile modo di collegamento dell'ugello al raccordo, il componente di collegamento è rappresentato in blu.

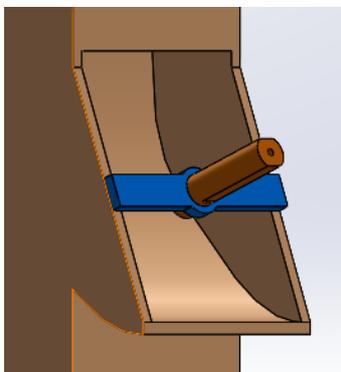


Figura 3.30: Porta ugello sistema 3

In particolare è possibile osservare il movimento di chiusura in figura 3.31, i due raccordi sono stati progettati in modo da generare una rotazione dei due bracci nel momento di chiusura evitando una sovrapposizione degli stessi. Essendo i due bracci progettati partendo dal piano frontale dell'assieme, si è facilitati nella progettazione del cavalletto (vedi sezione 3.5).

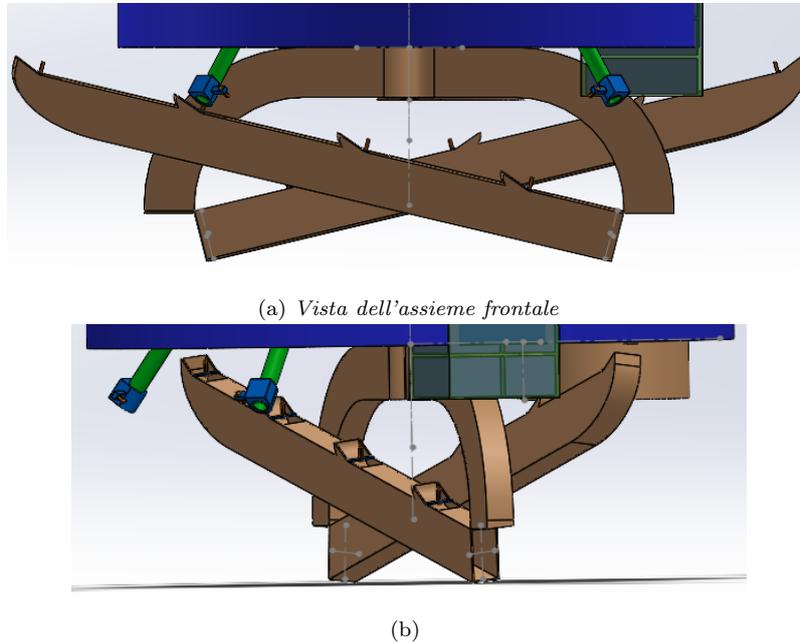


Figura 3.31: Chiusura sistema di distribuzione 3

3.5 Telaio

Il telaio che si progetta per questo sistema deve avere caratteristiche di leggerezza ma al tempo stesso di resistenza a sollecitazioni di tipo statico e dinamico. Materiali comunemente utilizzati sono il duralluminio, il polimero rinforzato in fibra di carbonio o la fibra di carbonio. Il telaio dovrebbe anche essere pensato in funzione dell'ambiente operativo di utilizzo per evitare problemi come lo stress termico ciclico indotto dalla luce del sole o la frattura fragile in ambienti freddi.

Il telaio è costituito da un'unità centrale, che ospita l'elettronica principale e le apparecchiature di comunicazione, ed è accoppiata con diversi bracci uniformemente distanziati ognuno dei quali ospita un singolo motore e un'elica. I bracci possono essere fatti con travi a traliccio o tubi, in seguito si vedrà la soluzione scelta. Tra le esigenze che si richiedono alla struttura si trova quella dei *bracci removibili*. Questa caratteristica è essenziale per il sistema in analisi, se così non fosse, l'APR sarebbe complicato da trasportare sul luogo di lavoro operativo. Il sistema smontato si viene dimensionato dentro un esagono con circonferenza esterna di diametro $900mm$.

L'analisi partirà dall'osservazione dei sistemi fino ad ora dimensionati senza considerare il sistema di distribuzione. Quest'ultimo questo verrà modificato per essere agganciato alla struttura, grazie al suo peso leggero. Si veda la figura 3.32 che riporta i sistemi e i riferimenti geometrici.

Per poter operare in sicurezza l'APR deve essere dotato di una piattaforma centrale in cui alloggiare le batterie, l'elettronica di bordo e il serbatoio. La piattaforma deve permettere la connessione ad essa da parte dei motori attraverso i bracci; del carrello di atterraggio attraverso dei giunti e del sistema di distribuzione attraverso una piastra. I componenti all'interno della piastra centrale dovrebbero essere sistemati sul centro di gravità (CG), va fatto presente che è il posto migliore soprattutto per il sistema di controllo, che deve, per forza maggiore, trovarsi in quella posizione. Oltre a questo, si tratterà, in un capitolo successivo, la progettazione del serbatoio in modo che la posizione del baricentro non vari in funzione del liquido che possiede. La piattaforma centrale deve essere in grado di sostenere i carichi, ma anche le sollecitazioni prodotte dai rotori

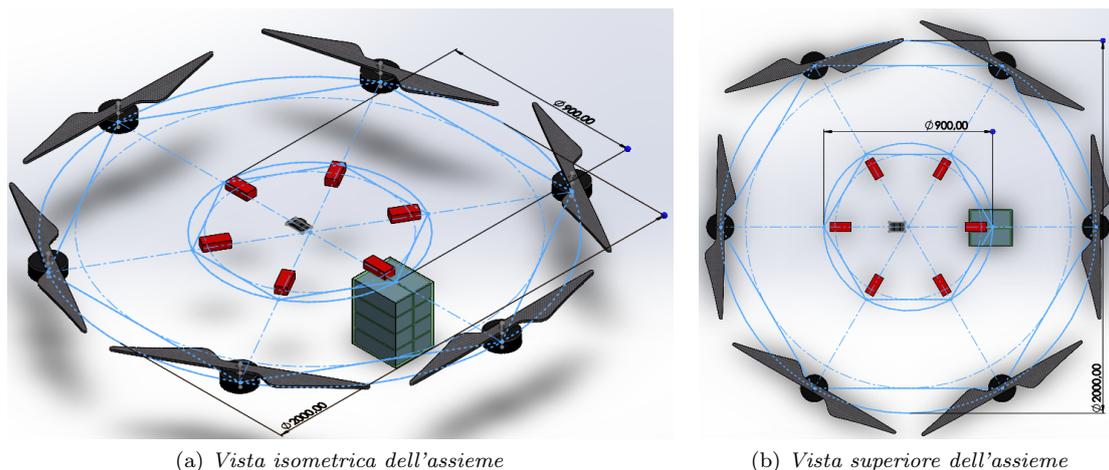


Figura 3.32: Assieme APR senza struttura

e le torsioni meccaniche (non dovrà piegarsi o essere debole alle varie sollecitazioni meccaniche provocate dal volo).

Si sceglie di creare una piastra centrale di forma esagonale, con i bracci inseriti negli spigoli dell'esagono. La scelta di allacciare i bracci negli spigoli e non nei lati dell'esagono è legata alla necessità di massimizzare la lunghezza dei bracci che entrano nella piastra centrale. Si vedano di seguito le varie parti modellizzate.

3.5.1 Bracci del sistema

I piloni di sostegno o bracci possono essere progettati in modalità ripiegabile o rigidi con la possibilità di essere tolti. È possibile stabilire che un telaio con braccia ripiegabili risulti comodo per il trasporto, ma sia senza dubbio più delicato, infatti gli snodi di collegamento ai bracci di sostegno possono rompersi o deformarsi con il tempo. I bracci di sostegno rigidi non offrono una capacità di trasporto conveniente; tuttavia, sono molto più robusti e difficili da danneggiare in caso di caduta accidentale (collisione causata da una manovra azzardata o da un evento esterno accidentale).

Per questo velivolo, essendo un APR di grossa taglia si sceglie di creare braccia rigide e non snodate con la possibilità di rimuoverle per il trasporto. Questa scelta viene fatta principalmente per due motivi:

- Il sistema completo è molto pesante, però una volta smontate le braccia, le varie parti prese singolarmente sono più leggere. Questo agevola il trasporto;
- Il sistema porta a un alleggerimento della struttura. Caratteristica importante in un sistema di volo, con tutti i vantaggi che ne conseguono.

Lo svantaggio delle braccia rigide è legato all'impossibilità di montare e smontare la struttura in modo comodo e veloce.

Scelta sezione braccio

Ora è necessario scegliere il tipo di sezione del braccio, è importante spiegare quali sono le differenze tra un tubo, un tubolare a sezione quadrata e un profilo:

- Tubo: materiale a sezione circolare;
- Tubolare a sezione quadrata: materiale a sezione quadrata o rettangolare;
- Profilo: materiale con una particolare geometria di sezione, diversa da quella rotonda, quadrata o rettangolare.

Dato il loro maggiore utilizzo rispetto ai profili speciali, i tubi e i tubi a sezione quadrata (nelle varie leghe metalliche) sono più facili da reperire sul mercato. Ne consegue anche che i loro costi di fornitura sono più bassi rispetto alle sezioni speciali. Avendo i bracci l'esigenza di resistere a sforzi di rotazione e alla fatica, si sceglie di utilizzare una sezione chiusa, in particolare la sezione circolare con spessore sottile. Questa ha la caratteristica di resistere a taglio ed è una sezione che contiene bene il peso. In particolare, se sottoposta a rotazione, le massime tensioni dovute alla flessione e alla torsione, si trovano in prossimità del diametro esterno dove c'è il materiale.

Il materiale scelto per i bracci è il composito in fibra di carbonio, in particolare la fibra AS4C 3k Hexcel, questa viene scelta per il confronto con la lega di alluminio 7075-T6 (ERGAL) visionato nell'analisi effettuata da Irjet [18]. Si può notare che lo stress di Von mises è quasi lo stesso in entrambi i casi, ma lo spostamento all'estremità della trave è superiore per la lega di alluminio rispetto al composito in fibra di carbonio. Hexcel AS4C offre un chiaro vantaggio rispetto alla lega di alluminio in termini di proprietà fisiche, poiché i valori di sollecitazione, deformazione e spostamento sono minimi. In particolare le caratteristiche meccaniche e fisiche del materiale sono visibili in tabella 3.12 e riportate in Solidworks per l'analisi strutturale e di massa.

Grandezza	Misura
Snervamento [N/m^2]	$4.41 \cdot 10^9$
Modulo Elastico [N/m^2]	$2.31 \cdot 10^{11}$
Coefficiente di Poisson	0.3
Densità di massa [kg/m^3]	1780

Tabella 3.12: Caratteristiche meccaniche Hexcel AS4C 3k

Il componente in questione si inserisce per una lunghezza di $50mm$ all'interno della piastra centrale. La misura del tubolare è di $511.25mm$ e la lunghezza è caratterizzata da 4 piani, come riportati in figura 3.33.

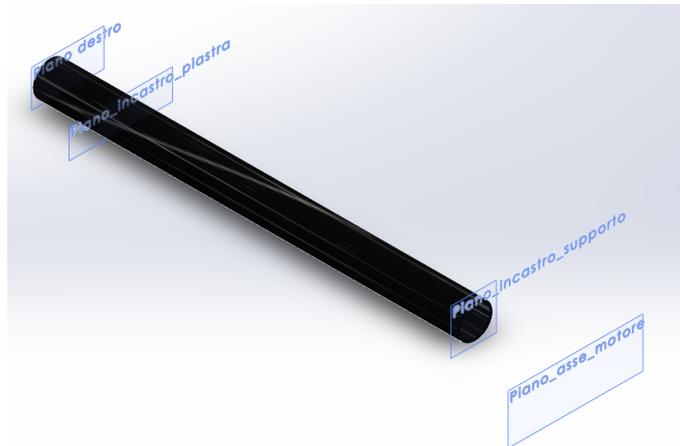


Figura 3.33: Braccio APR

I quattro piani sono tutti paralleli al piano destro che è quello da cui parte l'estrusione, il piano-incastro-piastra è a una distanza di $50mm$ e riporta la misura di quanto il tubolare è incastrato nella piastra, il piano-incastro-supporto è il piano in cui il supporto si incasterà e il piano-asse-motore è appunto il piano su cui vigerà l'asse del motore.

Le misure della sezione sono di una circonferenza di diametro $40mm$ e lo spessore di $2mm$, queste misure sono state scelte perché un tubo con queste misure è facilmente reperibile in commercio. Va verificato se lo spessore è sufficiente a reggere i carichi. In particolare, viene fatta un'analisi statica subito dopo aver progettato il supporto motore su cui si posizionerà il motore e quindi si applicheranno i carichi.

Supporto Motore

Per la realizzazione del supporto del motore in commercio si presentano due principali modelli. Il primo ha la caratteristica di avvolgere totalmente il braccio [8], mentre il secondo di lavorare su due punti concentrati e distanziati al fine di avere una maggiore leva [16]. I due modelli sono riportati in figura 3.34.

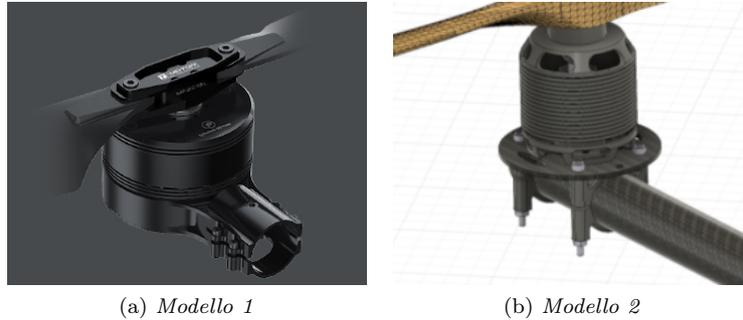


Figura 3.34: Modelli supporto motore

Si sceglie il modello 1, figura 3.34-a visto che è consigliata dalla marca del motore T-Motor.

In particolare, si sceglie di creare una parte che inglobi, per una lunghezza di 50mm, il tubolare attraverso una presa che lo pinza, si veda figura 3.35.

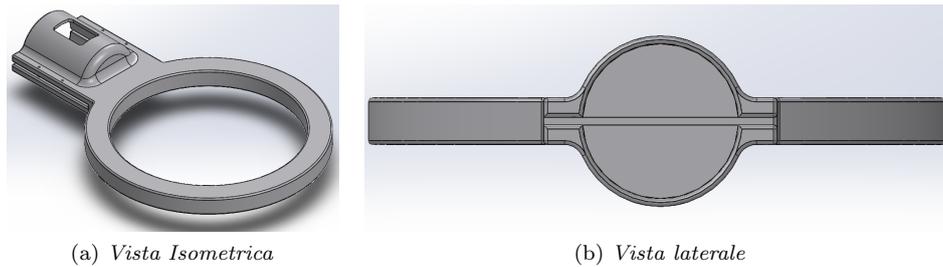


Figura 3.35: Supporto motore CAD

Il supporto motore viene progettato in Alluminio 7075-T6 (ERGAL), le caratteristiche fisiche e meccaniche ([18]) sono riportate in tabella 3.13. In particolare, si è scelto di alleggerire il sistema con dei tagli estrusi, sicuramente la parte può essere ottimizzata dal punto di vista della massa e della resistenza.

Grandezza	Misura
Snervamento [N/m^2]	$5.7 \cdot 10^8$
Modulo Elastico [N/m^2]	$7.2 \cdot 10^{10}$
Coefficiente di Poisson	0.33
Densità di massa [kg/m^3]	2810
Massa supporto [g]	264

Tabella 3.13: Caratteristiche meccaniche e fisiche del supporto motore - Al 7075-T6

Giunto braccio-struttura

Tra i primi componenti di connessione va progettato il giunto che collega il braccio motore con la struttura, questo è stato disegnato su Solidworks ed è riportato in figura 3.36.

Il giunto in questione viene progettato in Alluminio 7075-T6 (ERGAL), le caratteristiche fisiche e meccaniche ([18]) sono riportate in tabella 3.14. In particolare, si è scelto di alleggerire il sistema

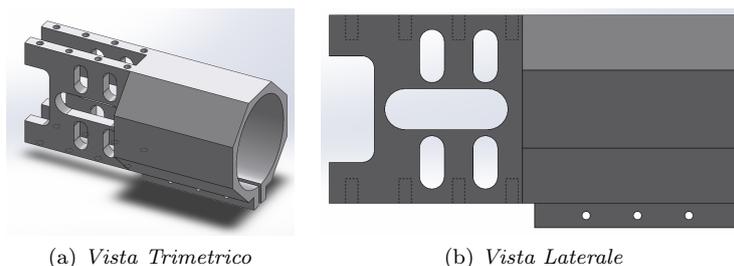


Figura 3.36: Giunto Braccio struttura CAD

con dei tagli estrusi, sicuramente la parte può essere ottimizzata dal punto di vista della massa e della resistenza.

Grandezza	Misura
Snervamento [N/m^2]	$5.7 \cdot 10^8$
Modulo Elastico [N/m^2]	$7.2 \cdot 10^{10}$
Coefficiente di Poisson	0.33
Densità di massa [kg/m^3]	2810
Massa giunto [g]	105

Tabella 3.14: Caratteristiche meccaniche e fisiche del giunto braccio-struttura - Al 7075-T6

Analisi FEM braccio

Per effettuare un'analisi del braccio (parte del telaio più soggetta a stress all'interno dell'intera struttura) è necessario creare un assieme che comprenda il giunto della struttura, il tubolare, il supporto motore e il motore. Ora che si hanno tutti i componenti si può effettuare un'analisi e verificare se gli spessori scelti sono sufficienti a sostenere i carichi. Il software utilizzato è lo stesso della progettazione: Solidworks. Grazie alla modalità 'Simulation' del programma si svolge un'analisi statica ponendo il vincolo di geometria fissa sulle due facce del giunto esterne e una forza di trazione verso l'alto perpendicolare alla faccia superiore del motore. Si decide anche di inserire tra i carichi la coppia generata dal motore.

Per quantificare il modulo dei carichi si effettua l'analisi nella peggiore condizione, ovvero a manetta massima del motore. In particolare, si ha una trazione verso l'alto del motore di $28.9kgf$ e una coppia pari a $14Nm$ scelta arbitrariamente in senso orario. La coppia inserita è pari a $14Nm$ mentre il carico inserito viene posto pari a $43.35kg$ considerando un fattore di sicurezza pari a 1.5. La figura 3.37 riporta la disposizione dei vincoli e dei carichi sul braccio in analisi.

Dopo il posizionamento dei carichi e dei vincoli è necessario creare la mesh, processo di scomposizione della forma geometrica di un oggetto in numerosi elementi che definiscono correttamente la forma fisica complessiva. Le condizioni vengono applicate a questi elementi e la soluzione viene calcolata e interpolata sull'intero dominio. La generazione di una mesh di alta qualità è uno dei fattori più critici da considerare per garantire l'accuratezza nella simulazione [17].

Ora si effettua l'analisi e in tabella 3.15 e in figura 3.38 vengono riportati i risultati.

Analisi	Valore Minimo	Valore Massimo
Sollecitazione - Von Mises [N/m^2]	$5.405 \cdot 10^2$	$1.124 \cdot 10^8$
Spostamento - URES [mm]	0	3.514
Deformazione equivalente - ESTRN	$1.175 \cdot 10^{-8}$	$1.28 \cdot 10^{-3}$

Tabella 3.15: Valori di sollecitazione, spostamento e deformazione dei tubolari dell'APR

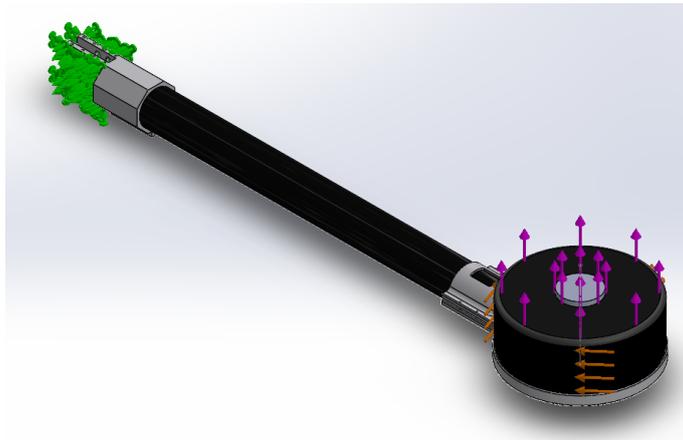
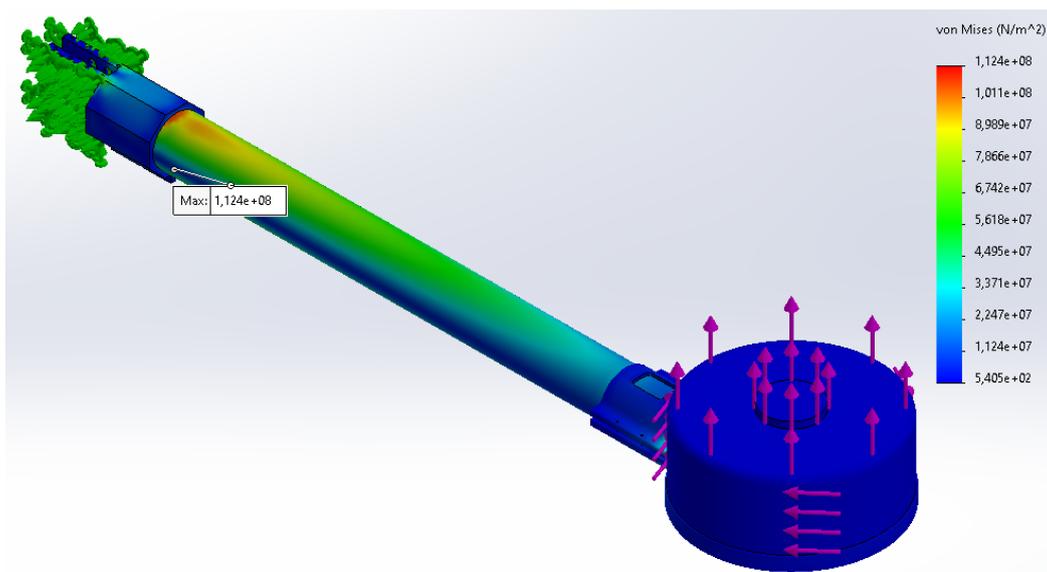
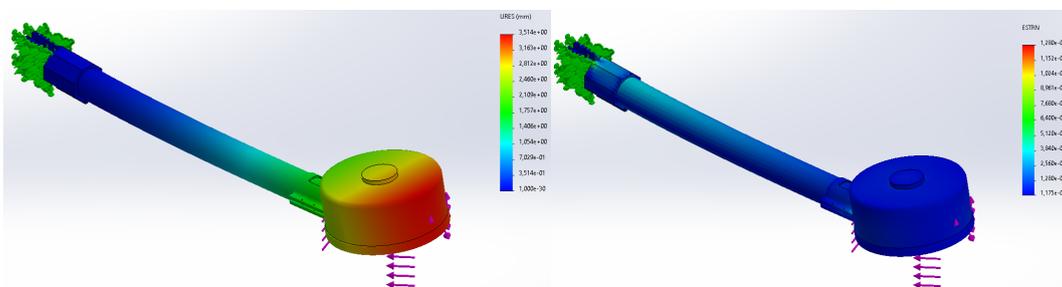


Figura 3.37: Vincoli e carichi su braccio in analisi statica



(a) Analisi Sollecitazione - Von Mises



(b) Analisi Spostamento - URES

(c) Analisi Deformazione equivalente - ESTRN

Figura 3.38: Risultati analisi statica Braccio APR

Come si nota dai risultati si raggiunge uno sforzo massimo (Von Mises) pari a circa 39 volte inferiore rispetto al valore di snervamento della fibra di carbonio presa a riferimento, si ha quindi una condizione di massima sicurezza della struttura. In particolare si nota dalla figura 3.38-a che il punto di massima sollecitazione è prossimo al giunto e soggetto a trazione.

È essenziale anche analizzare lo spostamento all'estremità, ovvero la freccia massima del tubolare, in particolare risulta essere pari a 3.514mm , questo valore sulla lunghezza del braccio è approssimabile a nullo (l'angolo che si viene a creare è pari a 0.37°). In questo caso non è necessario attuare nessun provvedimento a riguardo dello spostamento che c'è all'estremità. L'idea, nel caso non avesse risposto a un requisito desiderato, è quella di compensare l'eventuale flessione, dovuta alla spinta, calettando i motori in modo che siano leggermente aperti verso l'esterno. Questo porta inevitabilmente a complicazioni di montaggio e costruttive ingiustificate per questa configurazione. Per questa ragione si è deciso di calettare i motori paralleli alla piastra su cui giace la struttura centrale.

3.5.2 Struttura centrale

L'idea è quella di progettare una struttura centrale che permetta l'assorbimento dei carichi che dai bracci giungono al sistema. Questa struttura avrà misure sul piano $x - y$ che rispecchiano quelle ipotizzate precedentemente, ovvero una circonferenza di diametro 900mm . Essa sarà una struttura centrale fatta da due piastre in fibra di carbonio poste parallele l'una sopra l'altra e collegate tra loro nei punti di connessione con il resto dei componenti (ad esempio, con il giunto braccio-struttura o con l'allacciamento del serbatoio).

Le piastre si progettano con lo stesso materiale del tubolare, ovvero con l'Hexcel AS4C 3k, a livello di geometria sono estrusioni di un esagono con diametro esterno 900mm . Si prevede una larghezza minima di 50mm per effettuare il collegamento con il giunto dei bracci e uno spessore di 3mm ; questo porta la piastra ad avere una massa di 730g . In figura 3.39-a è riportato lo schizzo della piastra, mentre in figura 3.39-b è riportato l'assieme con le due piastre accoppiate ai bracci.

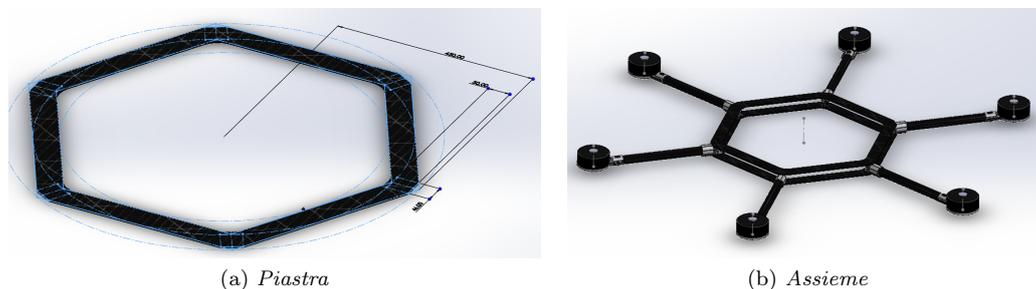


Figura 3.39: Piastra CAD

Per quanto una configurazione strutturale di questo tipo possa reggere i carichi a cui è soggetta, c'è il rischio che si instaurino torsioni spiacevoli nella struttura stessa ed è quindi necessario dare un supporto di rigidità.

Una soluzione potrebbe essere quella di pensare a componenti che svolgano un ruolo anche strutturale, come ad esempio il serbatoio. Esso, oltre ad avere la funzione di conservare il liquido fitosanitario, potrebbe supportare la struttura dove è agganciato. Questa soluzione è molto interessante, ma difficile da implementare. Dato il livello di approfondimento specifico di questa tesi, si sceglie di distribuire i carichi su altri componenti.

Il primo supporto strutturale è dato dal componente definito da questo studio "struttura basale" (figura 3.40-a). Questo porta tridimensionalità alla struttura centrale e consente anche un supporto per la sistemazione dei componenti al suo interno. In particolare, questo componente si collega alla piastra inferiore nei punti sottostanti il giunto del braccio, ha uno spessore di 2mm e una larghezza di 46mm ottenendo un peso di 485g .

Il secondo supporto con cui si irrobustisce la struttura avviene modificando la piastra sommitale inizialmente forata all'interno. La piastra superiore della struttura, figura 3.40-b sarà costituita all'esterno da una corona di larghezza 50mm con spessore di 3mm e all'interno con una piastra

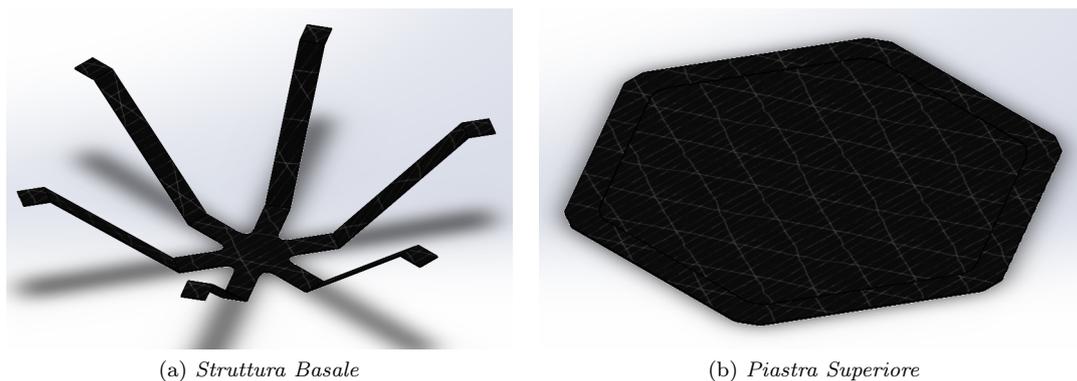


Figura 3.40: Componenti struttura CAD

più sottile di spessore di 1mm estesa su tutta la larghezza interna del corpo centrale. La struttura di un APR viene conformata per alloggiare tutti gli elementi necessari, tanto propulsivi quanto avionici, e viene scavata, dove possibile, per alleggerire il peso complessivo e consentire il passaggio dei cavi di potenza e segnale. In particolare, per lo specifico sistema, dalla piastra superiore è necessario poter effettuare il rifornimento del prodotto fitosanitario e la sostituzione delle batterie; a tale scopo verranno disposti dei fori sulla piastra centrale con spessore di 1mm per non recare danno alla tenuta strutturale.

3.5.3 Serbatoio

Il serbatoio è una parte importante dell'APR, questo viene progettato per ultimo con il grosso vantaggio di poterlo inserire negli spazi vuoti della struttura. Tra le caratteristiche che questo deve avere, la più importante è la necessità di posizionarlo in modo simmetrico, rispetto ai piani x e y del sistema. Lo svuotamento del sistema, che avviene durante la distribuzione, non deve portare a una variazione del baricentro per evitare problemi di stabilità e dinamica del volo. Altra caratteristica importante è quella di predisporre delle paratie di contenimento che smussino l'inerzia del liquido, queste vengono chiamate pareti anti sciabordio. Le soluzioni progettuali ipotizzate per il serbatoio sono due. La prima è quella di avere un serbatoio di forma parallelepipedica in grado di contenere i due pacchi batteria ai suoi lati; la seconda prevede di avere una forma a corona posizionata sulla struttura basale e che contenga al suo interno la batteria.

Si sceglie la seconda configurazione per la possibilità di posizionare facilmente nel baricentro il controllore di volo anche se ha lo svantaggio di essere difficilmente removibile (questo comporterà una ricarica del prodotto fitosanitario, piuttosto che una sostituzione del serbatoio).

Il serbatoio è riportato in figura 3.41, è possibile notare le sei paratie interne e il foro dove poter inserire il liquido da distribuire.

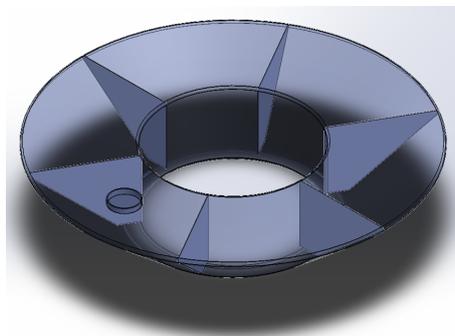


Figura 3.41: Serbatoio CAD

Il serbatoio ha una massa di $1050g$, un'altezza di $158mm$ e una dimensione esterna che combacia con la struttura basale. Lo spessore del materiale è di $1mm$ e il volume di liquido che si riesce a inserire è pari a $27.82dm^3$ per avere un paio di litri in eccesso rispetto a quello che richiede la missione.

3.5.4 Cavalletto di atterraggio

Il cavalletto di atterraggio deve supportare il peso dell'intero sistema nel momento in cui questo è a terra. Il cavalletto è di facile progettazione e deve essere di una lunghezza tale da permettere al sistema di distribuzione di non toccare terra.

Il cavalletto è costituito da quattro gambe che, con i rispettivi giunti, si collegano alla struttura. In particolare, vengono uniti sotto il giunto dei bracci motore, in corrispondenza della struttura basale.

La struttura è costituita quindi da un giunto; da un tubolare di spessore $2mm$ in materiale composito Hexcel AS4C 3k con un diametro esterno di $30mm$ e da un piede di appoggio che per semplicità corrisponde al giunto struttura-carrello. In particolare, il tubolare è alto $650mm$, si veda figura 3.42.

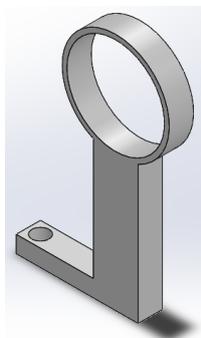


Figura 3.42: Carrello CAD

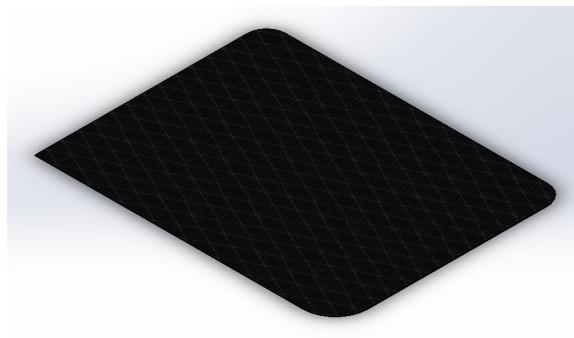
Come si può notare il tubolare ha una forma arrotondata, questo viene fatto per tre motivi. Il primo è la stabilità del sistema quando è a terra (più i piedi sono distanti dal baricentro e più il sistema è stabile). Il secondo è legato al fatto che se il cavalletto fosse dritto si rischierebbe di toccare la pianta dell'uva nella fase di distribuzione (vedi figura 3.46). Il terzo è legato a un fattore di sicurezza per i sistemi che l'APR trasporta (il cavalletto in questa configurazione può ammortizzare un eventuale caduta con la rottura del cavalletto stesso).

3.5.5 Dettagli assieme

Per concludere la geometria sono stati aggiunti dettagli quali un porta ugello (per i due ugelli che vanno posizionati fuori dai bracci di distribuzione) e una piastra (per collegare il sistema di distribuzione alla struttura). Questi due componenti vengono riportati in figura 3.43. Il porta ugello è in materiale plastico mentre la piastra è di carbonio Hexcel con spessore $0.75mm$ e ha un peso di $220g$.



(a) Porta ugello



(b) Piastra sistema di distribuzione

Figura 3.43: Componenti CAD

3.6 Geometria finale

Di seguito nelle figure 3.44, 3.45, 3.46 e 3.47 si riporta la restituzione grafica del sistema completo. In queste immagini il sistema è stato colorato di verde per migliorare l'effetto visivo che appare meno impattante.



Figura 3.44: Vista isometrica



Figura 3.45: Vista dal basso

Dopo la vista d'insieme del sistema è necessario giustificare il posizionamento scelto dei componenti. Le piastre si sono conformate per alloggiare tutti gli elementi necessari. Dove possibile i componenti sono stati scavati per alleggerire il peso complessivo e permettere il passaggio dei cavi di potenza e di segnale.

Il controllore di volo è stato inserito nel baricentro tra le due batterie. È utile, inoltre, prevedere di inserire una scatola di alluminio schermato contenente l'avionica di bordo per prevenire i disturbi elettromagnetici. Per agevolare la sostituzione delle batterie, queste vengono separate in due pacchi e disposte in modo tale da mantenere un peso simmetrico. La distribuzione dei pesi della strumentazione è bilanciata per far coincidere il baricentro con il centro dell'APR cioè il centro di spinta dei motori. Gli ESCs sono fissati sulla piastra superiore e si trovano in prossimità del motore, posti anch'essi simmetrici rispetto al centro dell'APR.



Figura 3.46: Vista frontale



Figura 3.47: Vista isometrica zoom

Il cavalletto è stato posto in maniera che l'ipotetico tunnel in cui passa il vigneto, durante la distribuzione, sia libero da ostacoli e il piano frontale del componente è stato posto con un'angolazione di 25° rispetto al piano frontale dell'assieme. Questo per evitare che si crei un'interferenza con la pianta in fase di distribuzione.

Il raccordo 2 del sistema di distribuzione, il braccio che sporge dal sistema, ha due centraline di controllo sincronizzate per permettere lo spostamento asincrono: in missione di volo si prevede un abbassamento prima di un braccio e poi del successivo per evitare lo scontro dei due. Si ricorda che questi si alzano per permettere l'atterraggio e per migliorare la guida fuori dalla fase di distribuzione.

La pompa che porta agli ugelli il prodotto fitosanitario è stata posizionata sulla piastra del sistema di distribuzione a fianco del compressore.

3.6.1 Tavole dell'assieme

Nella figura 3.48 si riporta la tavola con le misure indicative del sistema progettato in configurazione di distribuzione.

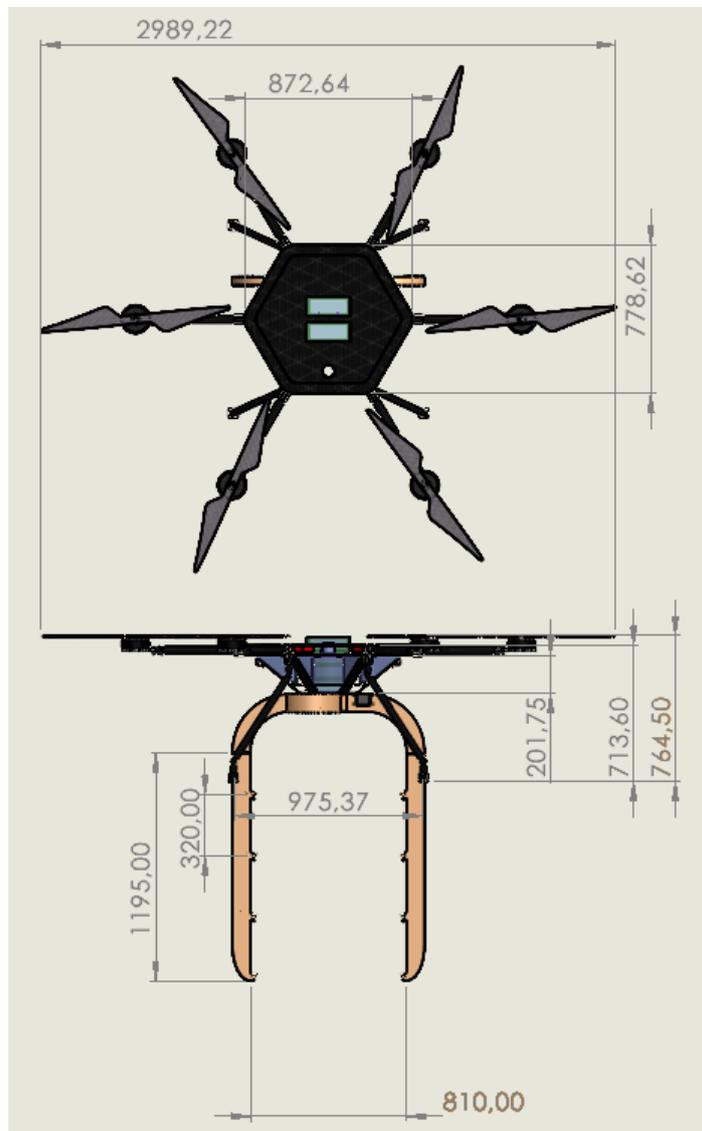


Figura 3.48: Tavola dell'assieme - configurazione di distribuzione

Nella figura 3.49 si riporta la tavola con le misure indicative del sistema progettato in configurazione di atterraggio.

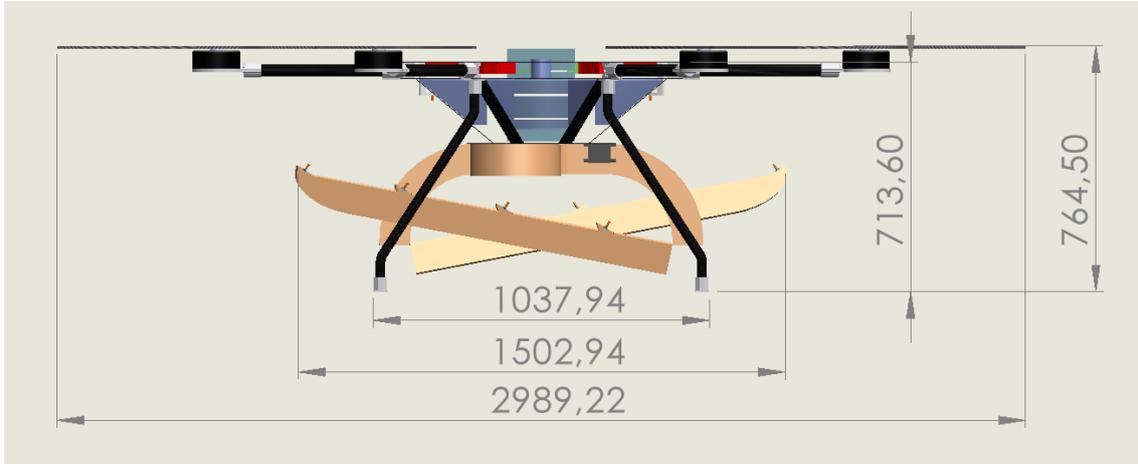


Figura 3.49: Tavola dell'assieme - configurazione di atterraggio

3.6.2 Controllo dell'assieme

In questa sottosezione si prevede di rivedere i conti eseguiti nella sezione 2.3 per verificare se il nuovo sistema soddisfa i requisiti.

Arrivati alla fine della tesi i dati sono leggermente cambiati e le masse della struttura e del sistema di distribuzione sono definite. In particolare vengono riportate in tabella 3.16 le masse dei componenti del sistema. A questa massa va aggiunta quella del liquido di distribuzione (25 kg) e quella del circuito idraulico ed elettrico. In particolare, per il sistema idraulico ed elettrico si ipotizza che con 5kg si riesca a effettuare un dimensionamento adeguato.

Componente	Massa	Quantità
Motore [g]	1740	6
Elica [g]	237	6
ECS [g]	279	6
Batteria [g]	10800	2
Pompa [g]	600	1
Compressore centrifugo [g]	1050	1
Raccordo 1 [g]	407	1
Raccordo 2 [g]	336	2
Serbatoio [g]	1065	1
Piastra Sistema di distribuzione [g]	220	1
Giunto braccio-struttura [g]	105	6
Tubolare braccio [g]	202	6
Supporto motore [g]	264	6
Piastra superiore [g]	1332	1
Piastra inferiore [g]	730	1
Supporto Basale [g]	485	1
Carrello di atterraggio [g]	377	4
Liquido fitosanitario [kg]	25	
Sistemi annessi [kg]	5	
Totale [kg]	76.8	

Tabella 3.16: Masse dell'assieme

La massa totale permette ora di verificare se la batteria dimensionata è sufficiente a svolgere il profilo di missione, per fare questa verifica si utilizza il codice chiamato *Controllo Finale* e riportato nella sezione B.4. Nel codice si inseriscono i dati del sistema dimensionato e si svolge un'analisi riguardante la percentuale di batteria usata.

In figura 3.50 si riporta il grafico dell'andamento del consumo di batteria in funzione del profilo di missione. In viola si evidenzia la potenza richiesta dai motori nelle rispettive fasi di volo (la potenza richiesta è massima all'inizio e man mano diminuisce). Con l'avanzamento del tempo, il prodotto fitosanitario viene distribuito e quindi il sistema globalmente diventa più leggero. Nelle fasi in cui viene distribuito il prodotto si ha un andamento decrescente lineare, mentre in quelle in cui il peso è costante, la richiesta di potenza è costante.

In nero si nota l'energia utilizzata dal sistema, il punto finale della curva permette di calcolare la differenza tra l'energia della batteria e l'energia richiesta dal sistema.

In rosso si riporta la linea dell'energia della batteria, si fa presente che è stata riportata la capacità della batteria già ridotta di un coefficiente di sicurezza. In pratica si riporta il valore di $3996Wh$ calcolati alla sezione 3.2 come $30Ah \cdot 22.2V \cdot 0.75 \cdot 8$.

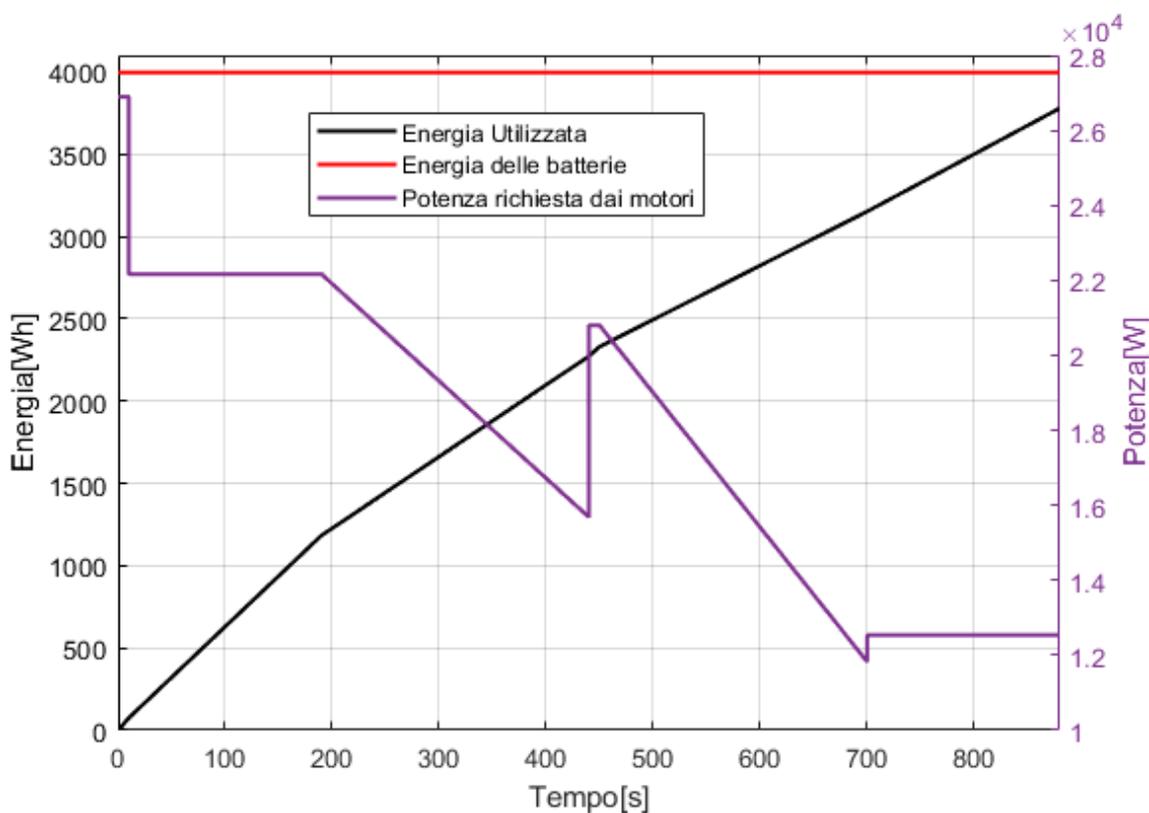


Figura 3.50: Andamento potenza ed energia in funzione del tempo

Si può notare dal grafico un divario tra la linea rossa e il punto finale della curva nera, il valore è pari a $200.04Wh$ che equivale a un 5.0060% di batteria rimanente.

Considerando che nella scelta del rapporto spinta-peso delle varie fasi di volo del profilo di missione si è fatta una scelta molto conservativa la batteria rimanente, secondo una nostra previsione, sarà superiore. Con un esubero di batteria rimanente è possibile pensare di trasportare più prodotto per effettuare più trattamenti durante ogni missione, questo porta a una velocizzazione dei tempi.

Tra gli sviluppi futuri è utile ipotizzare di creare un modello di simulazione che riporti la dinamica del velivolo di modo da simulare il profilo di missione in modo più veritiero.

3.6.3 Baricentro e momenti di inerzia

In questa sezione vengono riportate le caratteristiche geometriche e di inerzia del sistema sia in configurazione di distribuzione, con il raccordo disteso, sia in configurazione di atterraggio con il raccordo chiuso.

Si è preso come sistema di riferimento globale quello analizzato nella sezione 3.3, in particolare il piano x-y giace sulla piastra sommitale e l'asse z passante per il centro dell'APR (punto centrale di spinta).

Configurazione di distribuzione

In figura 3.51 si mostrano le due viste che permettono l'identificazione del baricentro dell'assieme.

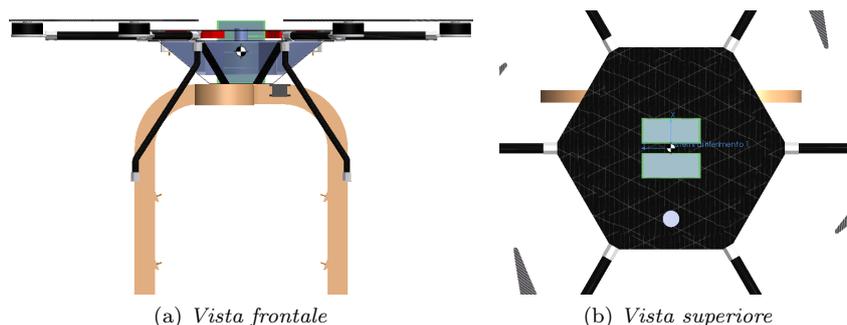


Figura 3.51: Posizione baricentro configurazione di distribuzione prodotto

La posizione del baricentro è spostata rispetto al sistema di riferimento dei valori riportati in tabella 3.17. Si può notare che lo sfasamento rispetto agli assi x e y è praticamente nullo e non crea problemi, il posizionamento dei sistemi in modo simmetrico è stato buono. Il baricentro su z è traslato di un valore negativo, quindi verso il terreno, questo è ottimo per il sistema. Essendo il baricentro sotto il piano delle eliche il sistema è intrinsecamente stabile: il sistema resta “appeso” alle eliche.

Posizione Baricentro	Valore
$dx[mm]$	-0.90
$dy[mm]$	0.11
$dz[mm]$	-98.25
Momento di inerzia	Valore
$I_{xx}[kg/m^2]$	10.26
$I_{yy}[kg/m^2]$	10.33
$I_{zz}[kg/m^2]$	17.42

Tabella 3.17: Baricentro e Momenti d'inerzia dell'assieme in configurazione di distribuzione

In tabella 3.17 vengono riportati i momenti di inerzia presi nel centro di massa e allineati con il sistema di riferimento globale.

Configurazione di Atterraggio

In figura 3.52 si mostrano le due viste che permettono l'identificazione del baricentro dell'assieme nella configurazione in cui i raccordi sono tenuti in alto.

La posizione del baricentro è spostata rispetto al sistema di riferimento globale dei valori riportati in tabella 3.18. Nella configurazione di atterraggio, nonostante il sistema di distribuzione sia in una nuova posizione, non si hanno problemi a livello di stabilità.

In tabella 3.18 vengono riportati i momenti di inerzia presi nel centro di massa e allineati con il sistema di riferimento globale.

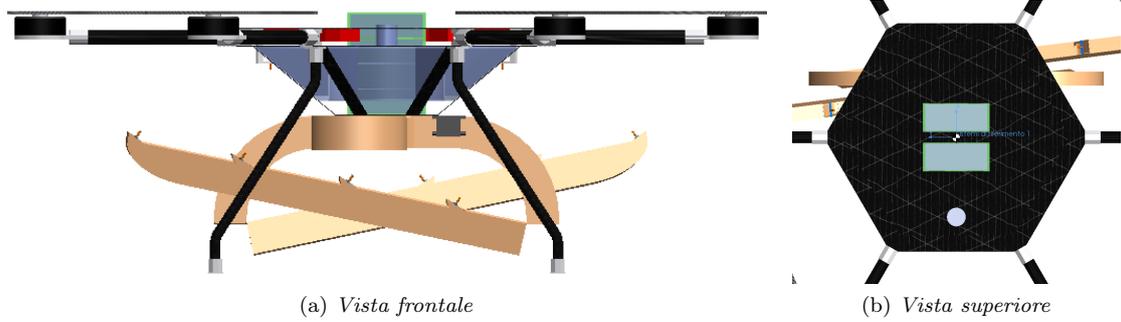


Figura 3.52: Posizione baricentro configurazione di atterraggio

Posizione Baricentro	Valore
$dx[mm]$	-0.90
$dy[mm]$	0.11
$dz[mm]$	-92.05
Momento di inerzia	Valore
$I_{xx}[kg/m^2]$	9.50
$I_{yy}[kg/m^2]$	9.61
$I_{zz}[kg/m^2]$	17.38

Tabella 3.18: Baricentro e Momenti d'inerzia dell'assieme in configurazione di atterraggio

Capitolo 4

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

In questa parte finale della tesi è possibile concretizzare i risultati prodotti nei vari capitoli e trarre le giuste conclusioni.

I requisiti imposti al capitolo 1 rappresentano la linea guida dello studio e sono relativi ad accorgimenti progettuali ed ecologici. Nei capitoli 2 e 3 si sono analizzate le complessità dei vari sottosistemi presi in analisi arrivando a una soluzione. Il sistema progettato ha la capacità minima di trasportare 25 litri di prodotto fitosanitario, permettendo la distribuzione in 500 metri lineari di vigneto. Le dimensioni orizzontali del drone rientrano in una circonferenza di raggio $1500mm$ e quelle verticali (a sistema chiuso) di $765mm$. Il sistema di distribuzione attuato è pensato per limitare le perdite e quindi la deriva del prodotto. La batteria del sistema è stata correttamente dimensionata per svolgere un profilo di missione completo, con un certo margine di carica residua al termine.

L'obiettivo del progetto è stato quello di ideare un sistema tecnicamente realizzabile ed economicamente sostenibile per migliorare la qualità della distribuzione di prodotti fitosanitari in vigneti con forte pendenze. Il sistema di distribuzione, per rispecchiare i requisiti, deve portare alla minimizzazione della deriva; questo rappresenta il punto critico e al tempo stesso innovativo del progetto. Ottenere questo risultato non è stato facile: si è optato per un sistema in grado di distribuire il prodotto fitosanitario mediante due braccia che avvolgono il vigneto. In questo modo si ha il vantaggio di una distribuzione puntuale anche se potrebbe esserci il rischio che il sistema si impigli tra i filari.

La progettazione sviluppata nella tesi costituisce una fase preliminare per un futuro approfondimento e la costruzione del sistema vero e proprio. Per il dimensionamento preliminare si sono fatti tre step trattati nei corrispondenti capitoli.

Nel capitolo 1 si è effettuata la stima del sistema attraverso un'analisi statistica: la massa del sistema stimata corrisponde a $62.7kg$.

Nel capitolo 2 si è fatta un'analisi concettuale del sistema cercando la soluzione in grado di soddisfare al meglio i requisiti imposti. È stata definita la configurazione dei vari sottosistemi e la potenza della batteria necessaria, grazie a un calcolo per iterazione, ottenendo una stima della massa del sistema pari a $80.6kg$.

Al capitolo 3, invece, si entra più nello specifico dei componenti, lasciando come unico scoperto lo studio dei circuiti elettrico e idraulico di distribuzione del prodotto. A questo capitolo si arriva a una stima della massa del l'APR pari a $76.8kg$ con una batteria avente una massa di circa $22kg$.

La differenza tra l'analisi statistica e il sistema dettagliato non è poca, si tratta di $15kg$. Si giustifica questa differenza sotto tre fronti: il primo è legato al il sistema di distribuzione, il secondo all'autonomia e il terzo alla sicurezza.

Il sistema di distribuzione è molto più pesante di quelli che si trovano comunemente montati su un APR, il sistema progettato, che permette di avvolgere la pianta, è complesso e ingombrante e necessita di un sottosistema che azioni il movimento di rotazione per la fase di atterraggio, comportando una massa superiore. La stima della massa della batteria risulta essere pari a circa il doppio rispetto a un analogo sistema UAV in commercio. Si tratta di una scelta volutamente conservativa e dovuta al tipo di studio ancora preliminare. La sicurezza rappresenta uno degli aspetti principali: i motori sono dimensionati con un rapporto $spinta_{tot}/peso_{tot}$ pari a 2.2. Questo rapporto è elevato, si sarebbero potuti scegliere 6 motori con un peso minore, riuscendo comunque a soddisfare le specifiche richieste; tuttavia, è stato preferito un sistema che, anche in caso di guasto di un motore, permetta il rientro alla base. Tra le analisi future effettuabili c'è sicuramente la simulazione della missione attraverso un software di calcolo che permetta una stima più accurata della massa della batteria. Si può inoltre svolgere una simulazione della risposta ad un eventuale guasto di un motore, per analizzarla in dettaglio.

Il profilo di missione scelto parte col portare l'APR in volo a una determinata quota, per spostarsi successivamente sopra il filare ed effettuare l'apertura dei raccordi. Avvenuto ciò, si procede alla fase di distribuzione, questa ha una durata che è in funzione della lunghezza del filare e non può superare i 500 metri lineari. Se i filari sono lunghi $50m$, ad esempio, l'APR, effettuerà il trattamento a 10 filari e, alla fine di ogni filare, si alzerà sopra lo stesso per traslare al successivo. Alla fine del trattamento il sistema si sarà svuotato del prodotto fitosanitario trasportato e richiederà i due raccordi per effettuare l'ultima fase della missione: il rientro al punto di partenza. Qui il sistema verrà ricaricato di prodotto fitosanitario e avverrà la sostituzione dei due pacchi batteria.

Il profilo di missione ha una durata di circa 15min: prevedendo di avere tre coppie di pacchi batteria (necessari a svolgere tre missioni) è possibile avere il drone sempre operativo. La soluzione di ricarica più semplice può avvenire attraverso la rete di distribuzione dell'energia elettrica oppure attraverso un generatore di corrente. Questa scelta avviene in funzione di dove si trova il punto di partenza del sistema. Infine, nel punto di partenza del sistema, è necessario avere a disposizione l'acqua per creare la soluzione fitosanitaria da distribuire (250 l per un ettaro di terreno).

Il sistema presenta dei problemi ancora da risolvere, tra cui la capacità di guidare l'APR a cavallo del finale: il pilota, per quanto bravo, se non assistito da sensori potrebbe avere difficoltà. Il secondo problema è la ricarica della batteria che per la maggior parte delle volte, visto l'ambiente di lavoro, sarà effettuata tramite generatore di corrente e quindi attraverso l'uso di combustibili fossili.

Per la risoluzione del primo problema si deve ricorrere a una guida autonoma, che oltretutto riduce il costo del lavoro dell'operatore. In questo modo l'operatore si occuperà solo della sostituzione dei componenti a fine profilo di missione e sarà in grado di lavorare in parallelo con più APR. Per risolvere il problema di ricarica, si può prevedere un sistema di pannelli solari trasportabili che assistano forniscano l'energia necessaria.

L'obiettivo della tesi è quello di provare a realizzare un sistema di distribuzione dei trattamenti che sia economicamente e tecnicamente sostenibile al fine di aiutare le realtà vitivinicole a migliorare la qualità dei prodotti del vigneto. I vantaggi di questo sistema sono relativi alla salute del vigneto che riceve un trattamento a contatto e dell'ambiente che non riceve sostanze dannose inutili. È possibile che questo studio venga ampliato grazie alla sempre maggiore valorizzazione dei vigneti con forte pendenza. Quando si otterrà un ricavo più elevato sul raccolto posto in questi siti sarà possibile un investimento maggiore per la ricerca di sistemi atti alla distribuzione di prodotti fitosanitari.

Il cambiamento potrebbe avvenire con un divieto, da parte dell'UE, dell'uso di atomizzatori a cannone. Questo cambiamento porterebbe a un grosso problema per i coltivatori, i quali dovrebbero ritornare ad usare la distribuzione a mano nei filari in cui non è possibile accedere con il trattore. Trovare manodopera disposta a svolgere un lavoro così stancante e pericoloso dal punto di vista della salute, non è facile oltre ad essere molto costoso. La suddetta soluzione ingegneristica, nonostante le sue problematiche, a questo punto, risulterebbe conveniente e meritevole di investimenti in termini di ricerca. Quando si potranno sperimentare queste soluzioni innovative, l'ingegneria dovrà essere pronta.

Ogni situazione va analizzata da più punti di vista. Lo studio in questione ha utilizzato molte risorse per risolvere i problemi legati allo sviluppo tecnologico dell'idea cercando il motore con il rendimento superiore, le batterie con una densità specifica più elevata, la realizzazione di una struttura in grado di reggere carichi pesanti. In realtà, i problemi non sono esclusivamente questi, ma quelli legati ai costi, ai limiti legislativi e soprattutto alle abitudini umane poco propense al cambiamento.

Appendice A

TABELLE COMPLETE

Macchina	Agras T30	Agras T20	Agras T16	Agras T10	Agras MG-1
Volume serbatoio pieno [l]	30	20	16	8	10
Peso tot (senza batt) [g]	26400	21100	18500	13000	9700
Peso motori [g]	4536	3696	3696	2108	2240
Peso batteria [g]	10100	6400	6500	3800	4500
Peso massimo al decollo [g]	76500	47500	42000	26000	24800
Larghezza massima [mm]	2858	2509	2509	1958	1460
Altezza [mm]	790	732	732	553	578
Trazione massima totale [g]	112200	81000	81000	44800	40800
Potenza Massima totale [W]	21600	14400	14400	8000	6160
Batterie rimovibili	sì	sì	sì	sì	no
Serbatoio rimovibile	no	sì	sì	sì	no
Vel vento sopportabile max [m/s]	8	8	8	8	8
vel di volo operativa max [m/s]	7	7	7	7	7
Motore					
Numero motori	6	6	6	4	8
diametro statore [mm]	100	100	100	100	60
altezza statore [mm]	18	15	15	10	10
valore KV [giri/min/V]	77	75	75	84	
Trazione massima [kg/rotore]	18,7	13,5	13,5	11,2	5,1
Potenza massima [W/rotore]	3600	2400	2400	2000	770
peso per motore [g]	756	616	616	527	280
Diametro eliche [cm]	96,522	83,8	83,8	83,8	53,34
Beccheggio eliche [cm]	50,8	22,86	22,86	22,86	17,8
Peso elica [g]	106	92	92	92	58
Batteria					
Modello	BAX501	AB3	AB2	BAX501	MG-12000P
Peso [kg]	10,1	6,4	6,5	3,8	4,5
Intervallo di scaricamento [C]	11,5	9		11,5	
Classe resistenza all'acqua	IP54	IP54	IP54	IP54	IP54
Capacità [mAh]	29000	18000	17500	9500	12000
Tensione	51,8	51,8	51,8	51,8	44,4
Durata hovering(no payload)[min]	20,5	15	18	19	20
Durata hovering(con payload)[min]	7,8	10	10	8,7	9
Massimo Consumo energetico [W]	11000	8300	5600	3700	6400
Consumo energetico con carico massimo in hovering [W]	10000	6200	4600	3200	3800

Tabella A.1: Tabella dei dati di macchina, motore e batteria

Sistema Spruzzatura	Agras T30	Agras T20	Agras T16	Agras T10	Agras MG-1
Modello	3,0 T30			T 3,0	
Tipo di pompa	Tip. a stantuffo			Tip. a membrana	
Peso sistema [kg]	3,9			3,1	
Volume serbatoio lordo[l]	40			12	
Classe resistenza all'acqua	IP67			IP67	
Dimensioni [mm]	560×435×320			405×245×375	
Tensione in entrata per sviluppo potenza [V]	60			60	
Tensione in entrata per effettuare controllo [V]	15			15	
Potenza massima per sviluppo potenza [W]	250			250	
Potenza massima per sviluppo potenza [W]	50			50	
Numero Ugelli	16	8		4	4
Flusso di spruzzatura max per ugello [l/min]	8	4,8	5,8	2,4	0,525
Caricatore Batteria a benzina					
Modello di caricatore	D9000i			D4500i	
Peso [kg]	65			36	
Dimensioni [mm]	610×520×625			480×422×427	
Parametri di uscita c.c. [V]	40-60			40-60	
Parametri di uscita c.c. [A]	120			50	
Potenza di Caricamento [W]	7200			3000	
Tempo di ricarica Completo [min]	9.-.12			7.-.10	
Capacità del serbatoio di carburante [l]	25			9	
Potenza massima del motore [W]	9000			4500	
Consumo di carburante per carica [l]	0,6			0,3	
Caricatore Batteriavia via cavo					
Modello di caricatore	T30			T10	
Peso [kg]	11,5			8,1	
Dimensioni [mm]	300×280×230			300×280×230	
Parametri di uscita c.c. [V]	40-60			40-60	50,4
Parametri di uscita c.c. [A]	120			50	
Potenza di Caricamento	7200			3600	2400
Tempo di ricarica Completo [min]	9.-.12			7.-.10	

Tabella A.2: Tabella dei dati del sistema di spruzzatura e dei caricatori utilizzabili

Appendice B

Codici MATLAB

B.1 Analisi statistica

```

1  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2  %----- Analisi statistica - cap1 -----%
3  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

5  %% Caricamento dati per analisi statistica
   clear all
7  close all
   clc

9

11 Nomi = ["Agras T30" "Agras T20" "Agras T16" "Agras T10" "Agras MG-1"];
12 Car = ["Volume serbatoio pieno [l]" "Peso totale (senza batterie) [g]" ...
13        "Peso motori [g]" "Peso batteria [g]" "Peso massimo al decollo [g]" ...
14        "Larghezza massima [mm]" "Altezza [mm]" ...
15        "Trazione massima totale [g]" "Potenza Massima totale [W]" ...
16        "Capacità batteria [mAh]"];
   Dati = xlsread('dati_analisi_statistica.xlsx');

17
18  %%NB: necessario inserire ad 'a' e 'b' i valori della riga in cui sono i
19  %dati, rispetto alla colonna di excel bisogna prendere il valore di riga
20  %a cui sono e togliere uno, perché matlab non ha importato la prima
21  %colonna e la prima riga

23 VOL_SERBATOIO = 25; %Volume max SCELTO

25

26  %% Grafico MTOM in funzione del Volume del serbatoio

27
28  a = 1; %ascisse
29  b = 5; %ordinate
   figure(1);
31 plot(Dati(a,:),Dati(b:,:), 'o', 'MarkerSize', 5)
   hold on
33 grid on
   text(Dati(a,:),Dati(b,:), Nomi(:), 'FontWeight', 'bold', ...
34        'margin', 2)
35 title('MTOM in funzione del Volume del serbatoio')
36 xlabel(Car(a));
37 ylabel(Car(b));

39
40  %% Retta di regressione
41  c = polyfit(Dati(a,:),Dati(b,:),1);
42  x = linspace(min(Dati(a:)),max(Dati(a:)),100);
43  z = polyval(c,x);
44  cc = polyfit(log(Dati(a:)),log(Dati(b:)),1);
45  A2 = exp(cc(2));
46  c2 = cc(1);
47  f = @(g) A2.*g.^c2;
   %axis ([350 500 200000 400000])
49 plot(x,z,'--','LineWidth',1,'Color','red')
   hold on
51 hold off

53 disp(['MTOM in funzione del volume del serbatoio \ty= ', ...
54        num2str(c(2)), '\t+ ', num2str(c(1)), '\tx'])

55
56 MTOM = (c(2)) + (c(1)) * VOL_SERBATOIO
57 disp('-----')

59 %% Grafico Trazione Massima in funzione del MTOM

```

```

61 a = 5;
62 b = 8;
63 figure(2);
64 plot(Dati(a,:),Dati(b,:), 'o', 'MarkerSize',5)
65 hold on
66 grid on
67 text(Dati(a,:),Dati(b,:),Nomi(:), 'FontWeight', 'bold', ...
68      'margin',2)
69 title('Trazione_Massima_in_funzione_del_MTOM')
70 xlabel(Car(a));
71 ylabel(Car(b));

72 % Retta di regressione
73 c = polyfit(Dati(a,:),Dati(b,:),1);
74 x = linspace(min(Dati(a,:)),max(Dati(a,:)),100);
75 z = polyval(c,x);
76 cc = polyfit(log(Dati(a:)),log(Dati(b:)),1);
77 A2 = exp(cc(2));
78 c2 = cc(1);
79 f = @(g) A2.*g.^c2;
80 %axis ([350 500 200000 400000])
81 plot(x,z,'--','LineWidth',1,'Color','red')
82 hold on
83 hold off

84 disp(['Trazione_Massima_in_funzione_del_MTOM_ÃÃy= ', ...
85      num2str(c(2)), '_+', num2str(c(1)), 'x'])

86 Trazione_Massima = (c(2)) + (c(1)) * MTOM
87 disp('-----')

88 %% Grafico CapacitÃ batteria in funzione del MTOM
89
90 a = 5;
91 b = 30;
92 figure(3);
93 plot(Dati(a,:),Dati(b,:), 'o', 'MarkerSize',5)
94 hold on
95 grid on
96 text(Dati(a,:),Dati(b,:),Nomi(:), 'FontWeight', 'bold', ...
97      'margin',2)
98 title('CapacitÃ_batteria_in_funzione_del_MTOM')
99 xlabel(Car(a));
100 ylabel('CapacitÃ_Batteria[mAh]');

101 % Retta di regressione
102 c = polyfit(Dati(a,:),Dati(b,:),1);
103 x = linspace(min(Dati(a,:)),max(Dati(a,:)),100);
104 z = polyval(c,x);
105 cc = polyfit(log(Dati(a:)),log(Dati(b:)),1);
106 A2 = exp(cc(2));
107 c2 = cc(1);
108 f = @(g) A2.*g.^c2;
109 %axis ([350 500 200000 400000])
110 plot(x,z,'--','LineWidth',1,'Color','red')
111 hold on
112 hold off

113 disp(['CapacitÃ_batteria_in_funzione_del_MTOM_ÃÃy= ', ...
114      num2str(c(2)), '_+', num2str(c(1)), 'x'])

```

```

121 Capacita_batt = (c(2)) + (c(1)) * MTOM
123 disp('-----')

125 %% Grafico Peso totale (senza batterie) in funzione del MTOM
127
128 a = 5;
129 b = 2;
figure(4);
131 plot(Dati(a,:),Dati(b,:), 'o', 'MarkerSize',5)
hold on
133 grid on
text(Dati(a,:),Dati(b,:),Nomi(:), 'FontWeight', 'bold', ...
135 'margin',2)
title('Peso_totale(senza_batteria) in funzione del MTOM')
137 xlabel(Car(a));
ylabel(Car(b));

139 % Retta di regressione
141 c = polyfit(Dati(a,:),Dati(b,:),1);
x = linspace(min(Dati(a,:)),max(Dati(a,:)),100);
143 z = polyval(c,x);
cc = polyfit(log(Dati(a,:)),log(Dati(b,:)),1);
145 A2 = exp(cc(2));
c2 = cc(1);
147 f = @(g) A2.*g.^c2;
%axis ([350 500 200000 400000])
149 plot(x,z,'--','LineWidth',1,'Color','red')
hold on
151 hold off

153 disp(['Peso_totale_senza_batteria in funzione del MTOM \u0303 y = ', ...
num2str(c(2)), '\u00b1 ', num2str(c(1)), 'x'])

155
Peso_tot = (c(2)) + (c(1)) * MTOM % peso totale senza batteria
157 disp('-----')

```

B.2 Progetto Concettuale

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 %----- PROGETTO CONCETTUALE -----%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
4

6 clear all
close all
8 clc
%% DATI
10 n_m = 6; %numero motori
manetta = ["50%" '55%' '60%' '65%' '75%' '85%' '100%'];
12 trazi1 = [8.900 10.800 12.700 14.600 18.900 23.100 28.900]; %kg
potenza1 = [995 1295 1610 1930 2810 3845 5520]; %W
14 trazi = trazi1*n_m;
potenza = potenza1*n_m;
16 M_serbatoio = 25; %massa liquido
d_b = 200; %densit   batterie [Wh/kg]
18 M_motore = 1.74 %massa motore [kg]
M_elica = 0.237 %massa elica [kg]

```

```

20 M_sistema_prop = n_m*(M_motore+M_elica)      %massa sistema propulsivo [kg]
M_sistema_distr = 5.6;                        %massa sistema ...
22 %distribuzione fitosanitario [kg]
M_sistemi = 7.4;                              %massa sistemi annessi ...
24 %(diviso 17.4 tra sistemi e strutture) [kg]
M_struttura = 10;                             %massa struttura ...
26 %(diviso 17.4 tra sistemi e strutture) [kg]

28 n_mot_sdd = 10;      %numero motori del sistema di distribuzione
pot_mot_sdd = 50;     %potenza di un motore del sistema di distribuzione [W]
30 %% retta di regressione

32 figure;
plot(traz,potenza,'o','MarkerSize',5)
34 hold on
grid on
36 text(traz(1,:),potenza(1,:),manetta(1:),'FontWeight','bold',...
      'BackgroundColor','w',...
38      'Margin',1,'Rotation',-10)
title(['Trend_Potenza_in_funzione_della_trazione'])
40 xlabel('Trazione [kg]');
ylabel('Potenza [W]');
42

44 % Retta di regressione
c = polyfit(traz,potenza,1);
46 x = linspace(min(traz),max(traz),100);
z = polyval(c,x);
48 cc = polyfit(log(traz),log(potenza),1);
A2 = exp(cc(2));
50 c2 = cc(1);
f = @(g) A2.*g.^c2;
52 plot(x,z,'--','LineWidth',1,'Color','red')
hold on
54 plot(x, f(x),'LineWidth',1,'Color','green')
hold off
56
disp(['La retta di regressione  $\tilde{A}_1 y =$ ', num2str(c(2)), ' + ', ...
58 num2str(c(1)), ' x'])
disp('-----')
60 disp(['La formula esponenziale  $\tilde{A}_1 y =$ ', num2str(A2), ' * x^', num2str(c2), ''])
disp('-----')
62

%% Calcolo iterativo
64
mtow=62.7
66 MTOW=zeros(5,1);
MTOW(1,1)=mtow
68 t0=10; %tempo fase 0
t1=180; %tempo fase 1
70 t2=250; %tempo fase 2
t3=10; %tempo fase 3
72 t4=250; %tempo fase 4
t5=180; %tempo fase 5
74 t_tot=t0+t1+t2+t3+t4+t5;

76 rsp0=2; %rapporto spinta peso fase 0
rsp1=1.75; %rapporto spinta peso fase 1
78 rsp2=1.5; %rapporto spinta peso fase 2
rsp3=2; %rapporto spinta peso fase 3
80 rsp4=1.5; %rapporto spinta peso fase 4

```

```

rsp5=1.75; %rapporto spinta peso fase 5
82
cs0=0; %carico svuotato fase 0
84 cs1=0; %carico svuotato fase 1
cs2=6; %carico svuotato fase 2
86 cs3=12.5; %carico svuotato fase 3
cs4=18.5; %carico svuotato fase 4
88 cs5=25; %carico svuotato fase 5

90 j=1;
err=100;
92 while err>0.01

94 %calcolo massa da trazionare (spinta): massa moltiplicata per il...
%rapporto spinta-peso
96 m_t=zeros(6,1);
m_t(1,1)=(mtow-cs0)*rsp0; %fase 0 - massa trazionata
98 m_t(2,1)=(mtow-cs1)*rsp1; %fase 1 - massa trazionata
m_t(3,1)=(mtow-cs2)*rsp2; %fase 2 - massa trazionata
100 m_t(4,1)=(mtow-cs3)*rsp3; %fase 3 - massa trazionata
m_t(5,1)=(mtow-cs4)*rsp4; %fase 4 - massa trazionata
102 m_t(6,1)=(mtow-cs5)*rsp5; %fase 5 - massa trazionata

104 %calcolo potenza [W]
P=zeros(6,1);
106 P(1,1)=A2*(m_t(1,1).^c2); %fase 0
P(2,1)=A2*(m_t(2,1).^c2); %fase 1
108 P(3,1)=A2*(m_t(3,1).^c2); %fase 2
P(4,1)=A2*(m_t(4,1).^c2); %fase 3
110 P(5,1)=A2*(m_t(5,1).^c2); %fase 4
P(6,1)=A2*(m_t(6,1).^c2); %fase 5
112

%calcolo energia [Ws]
114 E = zeros(6,1);
E(1,1) = (P(1,1).*t0); %fase 0
116 E(2,1) = (P(2,1).*t1); %fase 1
E(3,1) = (P(3,1).*t2); %fase 2
118 E(4,1) = (P(4,1).*t3); %fase 3
E(5,1) = (P(5,1).*t4); %fase 4
120 E(6,1) = (P(6,1).*t5); %fase 5
E_tot = 0;
122 for i=1:6
E_tot = E_tot+E(i,1);
124 end
E_tot = E_tot+n_mot_sdd*pot_mot_sdd*(t2+t4); %aggiunta energia del...
126 %consumo sistema di distribuzione
E_tot_h = E_tot/3600 %Energia in Wh
128

%calcolo masse
130 M_batt = E_tot_h/d_b; %massa batteria [kg]
mtow = M_sistema_prop+M_sistema_distr+M_sistemi+M_struttura+M_batt+...
132 M_serbatoio; %nuova mtow
MTOW(j+1,1)=mtow;
134
err=abs(MTOW(j,1)-mtow);
136 j=j+1;
end
138
%plot iterazione
140 figure
hold on

```

```

142 grid on
plot(1:1:length(MTOW),MTOW(:,1),'ob')
144 title('Andamento_valori_iterati')
xlabel('Numero_di_iterazioni')
146 ylabel('Valore_di_MTOW_alla_rispettiva_iterazione[kg]')

```

B.3 Dimensionamento Batterie

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2  %----- DIMENSIONAMENTO BATTERIE -----%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
4
6  clear all
close all
8  clc
%% DATI Sistema
10 V_power = 50; %[V]
E_tot_h = 4.2004e+03; %Energia in Wh - dal codice 'progetto concettuale'
12 P_m=33120; %W erogati dalla batteria con motori max
... (W_max_motore*numero_motori)
14 rapp_volume = 1.25; %rapporto tra il volume occupato dalle sole celle
...e dalle celle+involucro
16 Coeff_capacita_utilizzabile = 0.75; %Si suppone che la scarica sia
...fino al 20% della capacit  e la carica fino al 95% della capacit 
18 ...ne risulta che si pu  soltanto sfruttare il 75% della capacit 
...complessiva di un pacco batterie
20
Coeff_peso_sistema = 0.95; %Questa stima del peso include tutti i
22 ...componenti ausiliari, come le strutture del pacco batteria,
...i collegamenti elettrici, il sistema di gestione della batteria
24 ...(BMS) e il sistema di raffreddamento della batteria.
26 %% DATI Batteria T-Drones - ARES
V_cella = 22.2;
28 Q_cella = 30; %[Ah]
W_cella = 2.570; %[kg]
30 C_rate_scarica = 10; % [1/h] capacit  della cella: si scarica
...completamente in una frazione oraria pari a 1/2
32
Vol_cella = 0.090*0.210*0.068; %volume cella calcolato da brochure
34
%% Dimensionamento Batteria T-Drones - ARES
36
%Numero celle in serie
38 N_serie = V_power/V_cella;
N_serie = fix(N_serie);
40
%Numero celle in parallelo (dimensionamento in termini di potenza)
42
I_dc = P_m/(V_power); %A - Corrente max richiesta al pacco batteria
44
N_parallelo_1= I_dc/(C_rate_scarica*Q_cella); %Numero celle in parallelo
46 ...- calcolato in funzione della capacit  di scarica della batteria
48
%Numero celle in parallelo (dimensionamento in termini di energia)
50 E_batt = (E_tot_h)/Coeff_capacita_utilizzabile;

```

```

52 N_parallelo_2 = (E_batt)/(V_power*Q_cella); %N_parallelo_2 soddisfa
    ...il requisito di autonomia dell'intera missione
54
    %Numero celle totale
56 if N_parallelo_1 < N_parallelo_2
    N_parallelo = ceil(N_parallelo_2);
58 else
    N_parallelo = ceil(N_parallelo_1);
60 end
N_totali = N_serie*N_parallelo;
62
    %Conti Totali
64 W_batt = (N_totali*W_cella);
W_sis_el = (W_batt)/Coeff_peso_sistema;
66 Densita_ener = E_tot_h/W_sis_el;
Q_tot = E_batt/V_power;
68
    %Volume
70 Vol_celle_tot = Vol_cella*N_totali*1000; %in dm^3
72
Vol_pacco_std_tot = Vol_celle_tot*rapp_volume; %in dm^3
74
densi_cella = W_cella/(Vol_cella*1000); %in kg/dm^3
76
Densita_volumetrica = E_batt/(Vol_celle_tot); %in Wh/dm^3
78
    %stampa risultati
80 disp('-----')
disp('-----Batteria T-Drones - ARES-----')
82 disp('-----')
fprintf('Il numero di celle in serie: %g\n', N_serie)
84 fprintf('Il numero di celle in parallelo: %g\n', N_parallelo)
fprintf('Il numero di celle totali: %g\n', N_totali)
86 disp('-----')
fprintf('Il peso delle celle totali: %g Kg\n', W_batt)
88 fprintf('Il peso delle celle + sistema totale: %g Kg\n', W_sis_el)
fprintf('La densità energetica del sistema: %g Wh/Kg\n', Densita_ener)
90 fprintf('Il volume occupato: %g dm^3\n', Vol_celle_tot)
fprintf('Il volume occupato con l'involucro: %g dm^3\n', ...
92     Vol_pacco_std_tot)
fprintf('La densità della cella: %g kg/dm^3\n', densi_cella)
94 fprintf('La densità volumetrica: %g Wh/dm^3\n', Densita_volumetrica)

96 %% DATI Batteria Kokam UHE
V_cella = 3.67;
98 Q_cella = 26; %[Ah]
W_cella = 0.387; %[kg]
100 C_rate_scarica = 2; % [1/h] capacità della cella: si scarica
    ...completamente in una frazione oraria pari a 1/2
102 Vol_cella = 0.099*0.275*0.0079; %volume cella calcolato da brochure

104 %% Dimensionamento Batteria Kokam UHE

106 %Numero celle in serie
N_serie = V_power/V_cella;
108 N_serie = fix(N_serie);

110 %Numero celle in parallelo (dimensionamento in termini di potenza)

112 I_dc = P_m/(V_power); %A - Corrente max richiesta al pacco batteria

```

```

114 N_parallelo_1= I_dc/(C_rate_scarica*Q_cella); %Numero celle in parallelo
    ...- calcolato in funzione della capacit  di scarica della batteria
116
    %Numero celle in parallelo (dimensionamento in termini di energia)
118
    E_batt = (E_tot_h)/Coeff_capacita_utilizzabile;
120
    N_parallelo_2 = (E_batt)/(V_power*Q_cella); %N_parallelo_2 soddisfa
122    ...il requisito di autonomia dell'intera missione

124 %Numero celle totale
    if N_parallelo_1<N_parallelo_2
126         N_parallelo=ceil(N_parallelo_2);
    else
128         N_parallelo=ceil(N_parallelo_1);
    end
130 N_totali = N_serie*N_parallelo;

132 %Conti Totali
    W_batt = (N_totali*W_cella);
134 W_sis_el = (W_batt)/Coeff_peso_sistema;
    Densita_ener= E_tot_h/W_sis_el;
136 Q_tot= E_batt/V_power;

138 %Volume

140 Vol_celle_tot = Vol_cella*N_totali*1000; %in dm^3

142 Vol_pacco_std_tot = Vol_celle_tot*rapp_volume; %in dm^3

144 densi_cella = W_cella/(Vol_cella*1000); %in kg/dm^3

146 Densita_volumetrica = E_batt/(Vol_celle_tot); %in Wh/dm^3

148
    %stampa risultati
150 disp('-----Batteria_Kokam_UHE-----')
    disp('-----')
152 disp('-----')
    fprintf('Il numero di celle in serie  : %g\n', N_serie)
154 fprintf('Il numero di celle in parallelo  : %g\n', N_parallelo)
    fprintf('Il numero di celle totali  : %g\n', N_totali)
156 disp('-----')
    fprintf('Il peso delle celle totali  : %gKg\n', W_batt)
158 fprintf('Il peso delle celle + sistema totale  : %gKg\n', W_sis_el)
    fprintf('La densit  energetica del sistema  : %gWh/Kg\n', Densita_ener)
160 fprintf('Il volume occupato  : %gdm^3\n', Vol_celle_tot)
    fprintf('Il volume occupato con l'involucro  : %gdm^3\n', ...
162         Vol_pacco_std_tot)
    fprintf('La densit  della cella  : %gkg/dm^3\n', densi_cella)
164 fprintf('La densit  volumetrica  : %gWh/dm^3\n', Densita_volumetrica)

166
    %% DATI Batteria Tattu 28000mAh
168 V_cella = 22.2;
    Q_cella = 28; %[Ah]
170 W_cella = 3.389; %[kg]
    C_rate_scarica = 25; % [1/h] capacit  della cella: si scarica
172    ...completamente in una frazione oraria pari a 1/2
    Vol_cella = 0.200*0.120*0.065; %volume cella calcolato da brochure

```

```

174 %% Dimensionamento Batteria Tattu 28000mAh
176
177 %Numero celle in serie
178 N_serie = V_power/V_cella;
179 N_serie = fix(N_serie);
180
181 %Numero celle in parallelo (dimensionamento in termini di potenza)
182
183 I_dc = P_m/(V_power); %A - Corrente max richiesta al pacco batteria
184
185 N_parallelo_1= I_dc/(C_rate_scarica*Q_cella); %Numero celle in parallelo
186 ... - calcolato in funzione della capacit  di scarica della batteria
187
188 %Numero celle in parallelo (dimensionamento in termini di energia)
189
190 E_batt = (E_tot_h)/Coeff_capacita_utilizzabile;
191
192 N_parallelo_2 = (E_batt)/(V_power*Q_cella); %N_parallelo_2 soddisfa
193 ...il requisito di autonomia dell'intera missione
194
195 %Numero celle totale
196 if N_parallelo_1<N_parallelo_2
197     N_parallelo=ceil(N_parallelo_2);
198 else
199     N_parallelo=ceil(N_parallelo_1);
200 end
201 N_totali = N_serie*N_parallelo;
202
203 %Conti Totali
204 W_batt = (N_totali*W_cella);
205 W_sis_el = (W_batt)/Coeff_peso_sistema;
206 Densita_ener= E_tot_h/W_sis_el;
207 Q_tot= E_batt/V_power;
208
209 %Volume
210
211 Vol_celle_tot = Vol_cella*N_totali*1000; %in dm^3
212
213 Vol_pacco_std_tot = Vol_celle_tot*rapp_volume; %in dm^3
214
215 densi_cella = W_cella/(Vol_cella*1000); %in kg/dm^3
216
217 Densita_volumetrica = E_batt/(Vol_celle_tot); %in Wh/dm^3
218
219
220 %stampa risultati
221 disp('-----')
222 disp('-----Batteria_Tattu_28000mAh-----')
223 disp('-----')
224 fprintf('Il numero di celle in serie  : %g\n', N_serie)
225 fprintf('Il numero di celle in parallelo  : %g\n', N_parallelo)
226 fprintf('Il numero di celle totali  : %g\n', N_totali)
227 disp('-----')
228 fprintf('Il peso delle celle totali  : %gKg\n', W_batt)
229 fprintf('Il peso delle celle + sistema totale  : %gKg\n', W_sis_el)
230 fprintf('La densit  energetica del sistema  : %gWh/Kg\n', Densita_ener)
231 fprintf('Il volume occupato  : %gdm^3\n', Vol_celle_tot)
232 fprintf('Il volume occupato con l'involucro  : %gdm^3\n', ...
233     Vol_pacco_std_tot)
234 fprintf('La densit  della cella  : %gkg/dm^3\n', densi_cella)

```

```
fprintf('La densità volumetrica è: %g Wh/dm^3\n', Densita_volumetrica)
```

B.4 Controllo Finale

```

1  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
  %----- CONTROLLO FINALE -----%
3  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

5
6  clear all
7  close all
8  clc
9  %% DATI
10 n_m = 6; %numero motori
11 manetta = ["50%" '55%' '60%' '65%' '75%' '85%' '100%'];
12 traz1 = [8.900 10.800 12.700 14.600 18.900 23.100 28.900]; %kg
13 potenza1 = [995 1295 1610 1930 2810 3845 5520]; %W
14 traz = traz1*n_m;
15 potenza = potenza1*n_m;
16 M_serbatoio = 25; %massa liquido
17 d_b = 194; %densità batterie [Wh/kg]
18 M_motore = 1.74 %massa motore [kg]
19 M_elica = 0.237 %massa elica [kg]
20 M_ecs = 0.279
21 M_sistema_prop = n_m*(M_motore+M_elica+M_ecs) %massa sistema propulsivo [kg]
22 M_sistema_distr = 3.9; %massa sistema distribuzione
23 ...fitosanitario [kg]
24 M_sistemi = 5; %massa sistemi annessi
25 M_struttura = 7.8; %massa struttura
26 M_batt = 21.6; %massa batteria [kg]
27 E_batt_utilizz = 30*22.2*0.75*8; %wh utilizzabili della batteria

28
29 pot_compr_sdd = 132; %potenza compressore sistema di distribuzione [W]
  %% retta di regressione
30
31
32 figure;
33 plot(traz,potenza,'o','MarkerSize',5)
34 hold on
35 grid on
36 text(traz(1,:),potenza(1,:),manetta(1:), 'FontWeight','bold',...
37 'BackgroundColor','w',...
38 'Margin',1,'Rotation',-10)
39 title(['Trend_Potenza_in_funzione_della_trazione'])
40 xlabel('Trazione [kg]');
41 ylabel('Potenza [W]');
42
43
44 % Retta di regressione
45 c = polyfit(traz,potenza,1);
46 x = linspace(min(traz),max(traz),100);
47 z = polyval(c,x);
48 cc = polyfit(log(traz),log(potenza),1);
49 A2 = exp(cc(2));
50 c2 = cc(1);
51 f = @(g) A2.*g.^c2;
52 plot(x,z,'--','LineWidth',1,'Color','red')
53 hold on
54 plot(x, f(x),'LineWidth',1,'Color','green')
55 hold off

```

```

57 disp(['La retta di regressione  $\hat{y} =$ ', num2str(c(2)), ' + ', ...
      num2str(c(1)), 'x'])
59 disp('-----')
disp(['La formula esponenziale  $\hat{y} =$ ', num2str(A2), '*x^', num2str(c2), ','])
61 disp('-----')

63 %% Calcolo iterativo

65 mtow = (M_sistema_prop+M_sistema_distr+M_sistemi+M_struttura+M_batt+...
      M_serbatoio)*1 %nuova mtow

67
t0=10; %tempo fase 0
69 t1=180; %tempo fase 1
t2=250; %tempo fase 2
71 t3=10; %tempo fase 3
t4=250; %tempo fase 4
73 t5=180; %tempo fase 5
t_tot=t0+t1+t2+t3+t4+t5;

75
rsp0=2; %rapporto spinta peso fase 0
77 rsp1=1.75; %rapporto spinta peso fase 1
rsp2=1.5; %rapporto spinta peso fase 2
79 rsp3=2; %rapporto spinta peso fase 3
rsp4=1.5; %rapporto spinta peso fase 4
81 rsp5=1.75; %rapporto spinta peso fase 5

83 cs0=0; %carico svuotato fase 0
cs1=0; %carico svuotato fase 1
85 cs2=6.25; %carico svuotato fase 2
cs3=12.5; %carico svuotato fase 3
87 cs4=18.75; %carico svuotato fase 4
cs5=25; %carico svuotato fase 5

89
j=1;
91 err=100;

93 %calcolo massa da trazionare (spinta): massa moltiplicata per il...
%rapporto spinta-peso
95 m_t=zeros(6,1);
m_t(1,1)=(mtow-cs0)*rsp0; %fase 0 - massa trazionata
97 m_t(2,1)=(mtow-cs1)*rsp1; %fase 1 - massa trazionata
m_t(3,1)=(mtow-cs2)*rsp2; %fase 2 - massa trazionata
99 m_t(4,1)=(mtow-cs3)*rsp3; %fase 3 - massa trazionata
m_t(5,1)=(mtow-cs4)*rsp4; %fase 4 - massa trazionata
101 m_t(6,1)=(mtow-cs5)*rsp5; %fase 5 - massa trazionata

103 %calcolo potenza [W]
P=zeros(6,1);
105 P(1,1)=A2*(m_t(1,1).^c2); %fase 0
P(2,1)=A2*(m_t(2,1).^c2); %fase 1
107 P(3,1)=A2*(m_t(3,1).^c2); %fase 2
P(4,1)=A2*(m_t(4,1).^c2); %fase 3
109 P(5,1)=A2*(m_t(5,1).^c2); %fase 4
P(6,1)=A2*(m_t(6,1).^c2); %fase 5

111
%calcolo energia [Ws]
113 E = zeros(6,1);
E(1,1) = (P(1,1).*t0); %fase 0
115 E(2,1) = (P(2,1).*t1); %fase 1
E(3,1) = (P(3,1).*t2); %fase 2

```

```

117 E(4,1) = (P(4,1).*t3);           %fase 3
    E(5,1) = (P(5,1).*t4);           %fase 4
119 E(6,1) = (P(6,1).*t5);           %fase 5
    E_tot = 0;
121 for i=1:6
    E_tot = E_tot+E(i,1);
123 end
    E_tot = E_tot+pot_compr_sdd*(t2+t4); %aggiunta energia del...
125 %consumo sistema di distribuzione
    E_tot_h = E_tot/3600           %Energia in Wh
127 E_rimanente = E_batt_utilizz-E_tot_h           %energia rimanente dopo
    ... profilo di missione svolto
129 Perc_rimanente = E_rimanente/E_batt_utilizz*100 % perc energia rimanente

131 % grafico andamento energia in funzione del tempo
    tempo=[0;t0;t0+t1;t0+t1+t2;t0+t1+t2+t3;t0+t1+t2+t3+t4;t0+t1+t2+t3+t4+t5];
133 energia=[0;E(1,1);E(1,1)+E(2,1);E(1,1)+E(2,1)+E(3,1);E(1,1)+E(2,1)+E(3,1)
    +E(4,1);E(1,1)+E(2,1)+E(3,1)+E(4,1)+E(5,1);E(1,1)+E(2,1)+E(3,1)+E(4,1)
135 +E(5,1)+E(6,1)]./3600;
    en_batt=ones(7,1)*E_batt_utilizz;
137 tempo2=[0;t0;t0+t1;t0+t1+t2;t0+t1+t2+t3;t0+t1+t2+t3+t4;t0+
    t1+t2+t3+t4;t0+t1+t2+t3+t4;t0+t1+t2+t3+t4+t5];
139 potenza_motore=[P(1,1); P(1,1); P(2,1);P(2,1);P(3,1); P(4,1);P(4,1);
    P(5,1);P(5,1);P(6,1);P(6,1)];
141 yyaxis left
    plot(tempo,energia,'-k',tempo,en_batt,'-r','LineWidth',1.5)
143 ylim([0 4100]);
    xlim([0,t_tot]);
145 yyaxis right
    plot(tempo2,potenza_motore,'LineWidth',1.5)
147
149 grid on
149
151 yyaxis left
    title('Andamento in funzione del tempo [s]')
    xlabel('Tempo [s]')
153 ylabel('Energia [kWh]')
    yyaxis right
155 ylabel('Potenza [kW]')
    legend('Energia Utilizzata','Energia delle batterie',
157 'Potenza richiesta dai motori');

```


Bibliografia

- [1] Catalogo hinelson pag 391.
- [2] Compressore sanyo denki, modello 978-9tp48p0g001.
- [3] Dji agricoltura.
- [4] Sito web braglia.
- [5] Sito web half chrome.
- [6] Sito web kokam - sezione aviation-uav.
- [7] Sito web t-drones - ares 6s 30000mah.
- [8] Sito web t-motor.
- [9] Sito web tattu.
- [10] Progetto di un velivolo ibrido, 2020.
- [11] Marcin Biczyski, Rabia Sehab, James F Whidborne, Guillaume Krebs, and Patrick Luk. Multicopter sizing methodology with flight time estimation. *Journal of Advanced Transportation*, 2020, 2020.
- [12] Pasquale Daponte, Luca De Vito, Luigi Glielmo, Luigi Iannelli, Davide Liuzza, Francesco Picariello, and Giuseppe Silano. A review on the use of drones for precision agriculture. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, volume 275, page 012022. IOP Publishing, 2019.
- [13] ENAC. Regolamento mezzi aerei a pilotaggio remoto.
- [14] Johan Fogelberg. Navigation and autonomous control of a hexacopter in indoor environments. 2013.
- [15] Giorgio Guglieri. Meccanica del volo dell'elicottero - appunti corso.
- [16] Roy Issa, Reinhard Puffing, and Emad Manla. Design of a hexadrone for agricultural spraying- a collaboration project between west texas a&m university and fh joanneum. In *2020 Gulf Southwest Section Conference*, 2020.
- [17] Parthiban.K Kathiravan.T, Mohammed Huda.A. Structural and modal analysis of subsonic aircraft wing using ansys workbench. 2018.
- [18] S Siva Sai Krishna and Nutakki Priyatham. Structural analysis of an aircraft wing with aluminium alloy and carbon fibre reinforced polymer using finite element analysis. 2021.
- [19] M Lazzari, A Longoni, E Beretta, and S Landonio. Distribuzione dei fitofarmaci: stato dell'arte e impiego di attrezzature intelligenti per il contenimento dei costi e il miglioramento della sostenibilità delle produzioni vitivinicole milanesi e lombarde. 2015.

- [20] Robert C Leishman, John C Macdonald, Randal W Beard, and Timothy W McLain. Quadrotors and accelerometers: State estimation with an improved dynamic model. *IEEE Control Systems Magazine*, 34(1):28–41, 2014.
- [21] Paolo Maggiore. Azionamenti elettrici - appunti corso.
- [22] Matteo Masuelli. *UAV/UGV control&navigation with smartphone*. PhD thesis, Politecnico di Torino, 2021.
- [23] Winery La Bruciata of Bosio Oscar. Azienda vitivinicola di oscar bosio in valdivilla, 2021.
- [24] D Pessina and D Facchinetti. Il ruolo del web nel monitoraggio degli incidenti mortali dovuti al ribaltamento dei trattori agricoli. *Atti Conv. Medio Termine AIIA*, pages 22–24, 2011.
- [25] Poderi Roccanera. Viticoltori da oltre 100 anni, 2021.
- [26] MP Stewart and ST Martin. Unmanned aerial vehicles: fundamentals, components, mechanics, and regulations. *Unmanned Aerial Vehicles*, 2021.
- [27] Bhakti Yudho Suprpto and Benyamin Kusumoputro. Optimized neural network-direct inverse control for attitude control of heavy-lift hexacopter. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC)*, 9(2-5):103–107, 2017.
- [28] Tojo Vini. 27 anni e tanta, tanta passione!, 2021.
- [29] Fu-Hsuan Wen, Fu-Yuen Hsiao, and Jaw-Kuen Shiau. Analysis and management of motor failures of hexacopter in hover. In *Actuators*, volume 10, page 48. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021.