

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA AEROSPAZIALE
Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA
in Meccanica del Volo

Valutazione delle prestazioni di eliche intubate per multirotori

CANDIDATO
Michele Fantini

RELATORE
Dott. Fabrizio Giulietti
CORRELATORE
Dott. Gianluca Rossetti

Anno Accademico 2018/2019

«*Efficiency is just clever laziness*»

Anonimus

*A Isa,
la migliore amica che io
abbia mai avuto.*

Indice

Introduzione.....	19
1. Capitolo 1	23
1.1. Fondamenti di aerodinamica	23
1.1.1. Principio “0” dell’aerodinamica	23
1.1.2. Principio di conservazione della massa	23
1.1.3. Definizione di fluido:.....	24
1.1.4. Ipotesi di continuità	25
1.1.5. Ipotesi di incomprimibilità.....	27
1.2. Elica aeronautica.....	30
1.2.1. Introduzione all’elica	30
1.2.2. Geometria	31
1.2.3. Coefficienti adimensionali	32
1.3. Teoria del disco attuatore in moto assiale.....	35
1.5. Elica intubata	38
2. Capitolo 2	41
2.1. Motore elettrico	41
2.1.1. Motori elettrici D/C	41
2.1.2. Motori elettrici A/C	42
2.1.3. Motore utilizzato nei test	44
2.2. Regolatore di giri E.S.C.	47

2.2.1.	Regolatori per motori D/C	48
2.2.2.	Regolatore per motore A/C	48
2.2.3.	Regolatore utilizzato	50
2.3.	Elica utilizzata	52
2.4.	Batterie e alimentazione	53
2.4.1.	Alimentazione sfruttata	54
2.5.	Banco prova	55
2.5.1.	Banco prova utilizzato	56
2.5.2.	Sicurezza	59
3.	Capitolo 3	61
3.1.	Programma di acquisizione dati	61
3.1.1.	Modalità d'acquisizione dati	62
3.1.2.	Procedura di avvio test	63
3.2.	Progettazione della struttura	64
3.2.1.	Programma C.A.D.	64
3.2.2.	Progettazione supporto imbocchi	65
3.2.3.	Progettazione imbocchi	67
3.3.	Realizzazione degli imbocchi	72
3.3.1.	Realizzazione imbocco α	72
3.3.2.	Realizzazione imbocco β	72
3.3.3.	Stampa 3D	74
3.5.	Analisi senza imbocchi	78
3.6.	Analisi e risultati <i>imbocco α</i>	80

3.7. Analisi e risultati <i>imbocco</i> γ	84
4. Capitolo 4	85
4.1. Confronto grafici	85
4.1.1. Spinta su velocità di rotazione	85
4.1.2. Spinta su potenza elettrica.....	86
4.1.3. Figura di merito elettrica su velocità di rotazione.....	87
4.1.4. Figura di merito meccanica su velocità di rotazione.....	88
5. Conclusioni	89

Lista degli acronimi

- A.P.R. – Aeromobile a pilotaggio remoto
- B.E.C. - Battery elimination circuit
- C.F.D. – Computational fluid dynamics (analisi fluidodinamica computazionale)
- D.d.p. – differenza di potenziale
- E.N.A.C. – Ente Nazionale Aviazione Civile
- E.S.C. – Electronic speed controller (regolatore di velocità elettronico)
- M.O.S.F.E.T. - Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor
- P.C.B. - Printed circuit board
- P.V.C. - Polyvinyl chloride
- P.W.M. - Pulse-Width Modulation
- R.P.M. – Rivoluzioni per minuto
- S.A.P.R. – Sistema aeromobile a pilotaggio remoto
- U.A.V. - Unmanned aerial vehicle

Indice figure

Figura 1 - Tabella Casarosa.....	19
Figura 2 - Classificazione droni	20
Figura 3 - Schema cablaggio generale quadricottero.....	21
Figura 4 - Principio Zero di Reciprocità	23
Figura 5 - Principio di conservazione	26
Figura 6 - Schema pala.....	31
Figura 7 - Passo geometrico e passo effettivo.....	34
Figura 8 - Angoli dell'elica.....	34
Figura 9 - Schema disco attuatore	35
Figura 10 - Aeromobile Stipa Caproni.....	38
Figura 11 - Particolare del gruppo propulsivo dello Stipa Caproni	39
Figura 12 - Schema funzionamento motore D/C	42
Figura 13 – Motore D/C	42
Figura 14 – Motore A/C	43
Figura 15 – Schema di funzionamento motore A/C.....	43
Figura 16 – T MOTOR Antigravity 4006 KV 380	44
Figura 17 - Tabella dati Antigravity 4006.....	46
Figura 18 - Regolatore di giri per motori D/C	48
Figura 19 - Regolatore di giri per motori A/C	49
Figura 20 - Modulazione PWM, variazione di lunghezza dell'impulso.....	49
Figura 21 - Regolatore TMotor T40 A.....	50
Figura 22 - Eliche RC-Timer 16x5.5	52
Figura 23 - Keithley 2260B-30-72.....	54
Figura 24 - Cella di carico	55
Figura 25 - Banco prova modificato con labbro	56
Figura 26 - Cella di carico spinta	57
Figura 27 - Celle di carico coppia	57

Figura 28 - Disposizione delle celle di carico	57
Figura 29 - Valori di operatività banco prova	58
Figura 30 - Staffa supporto motore	59
Figura 31 - Staffa supporto motore	59
Figura 32 - Schermata programma acquisizione dati.....	61
Figura 33 – Script per plot delle misure dirette.....	62
Figura 34 – Script per plot delle misure indirette	63
Figura 35 – Software C.A.D. Solidworks	64
Figura 36 - Supporto imbocchi.....	65
Figura 37 - Asta in alluminio reggi imbocchi	66
Figura 38 - Elemento angolare del supporto	66
Figura 39 - Blocco mobile di collegamento tra supporto e labbri	66
Figura 40 - Supporto reggi labbri assemblato	67
Figura 41 - Imbocchi valutati nello studio della facoltà di Oradea.....	68
Figura 42 - Imbocco con pareti dritte.....	69
Figura 43 - Imbocco con pareti dritte - misure effettive	69
Figura 44 – Imbocco convergente pesante.....	70
Figura 45 - Imbocco convergente pesante - misure effettive.....	70
Figura 46 - Imbocco convergente leggero.....	71
Figura 47 - Imbocco convergente leggero - misure effettive.....	71
Figura 48 – Stampante in opera su imbocco tipo β	72
Figura 49 – Test di incollaggio.....	73
Figura 50 – Raise 3D.....	74
Figura 51 - Banco prova, test senza imbocchi	78
Figura 52 - Banco prova, test senza imbocchi	78
Figura 53 – Spinta su potenza elettrica, nessun imbocco.....	79
Figura 54 – Spinta su velocità di rotazione, nessun imbocco	79
Figura 55 – Figura di merito meccanica su velocità di rotazione, nessun imbocco ...	79
Figura 56 - Figura di merito elettrica su velocità di rotazione, nessun imbocco	79

Figura 57 – Banco prova, test imbocco tipo α	80
Figura 58 – Banco prova, test imbocco tipo α	80
Figura 59 – Spinta su potenza elettrica, imbocco α	81
Figura 60 – Spinta su velocità di rotazione, imbocco α	81
Figura 61 – Figura di merito elettrica su velocità di rotazione, imbocco α	81
Figura 62 – Figura di merito meccanica su velocità di rotazione, imbocco α	81
Figura 63 – Banco prova, test imbocco β	82
Figura 64 – Banco prova, test imbocco β	82
Figura 65 – Spinta su velocità di rotazione, imbocco β	83
Figura 66 – Spinta su potenza elettrica, imbocco β	83
Figura 67 – Figura di merito meccanica su velocità di rotazione, imbocco β	83
Figura 68 – Figura di merito elettrica su velocità di rotazione, imbocco β	83
Figura 69 – Banco prova, test imbocco γ	84
Figura 70 – Banco prova, test imbocco γ	84
Figura 71 – Spinta su velocità di rotazione, confronto	85
Figura 72 – Spinta su potenza elettrica, confronto	86
Figura 73 – Figura di merito elettrica su velocità di rotazione, confronto.....	87
Figura 74 – Figura di merito meccanica su velocità di rotazione, confronto	88

Introduzione

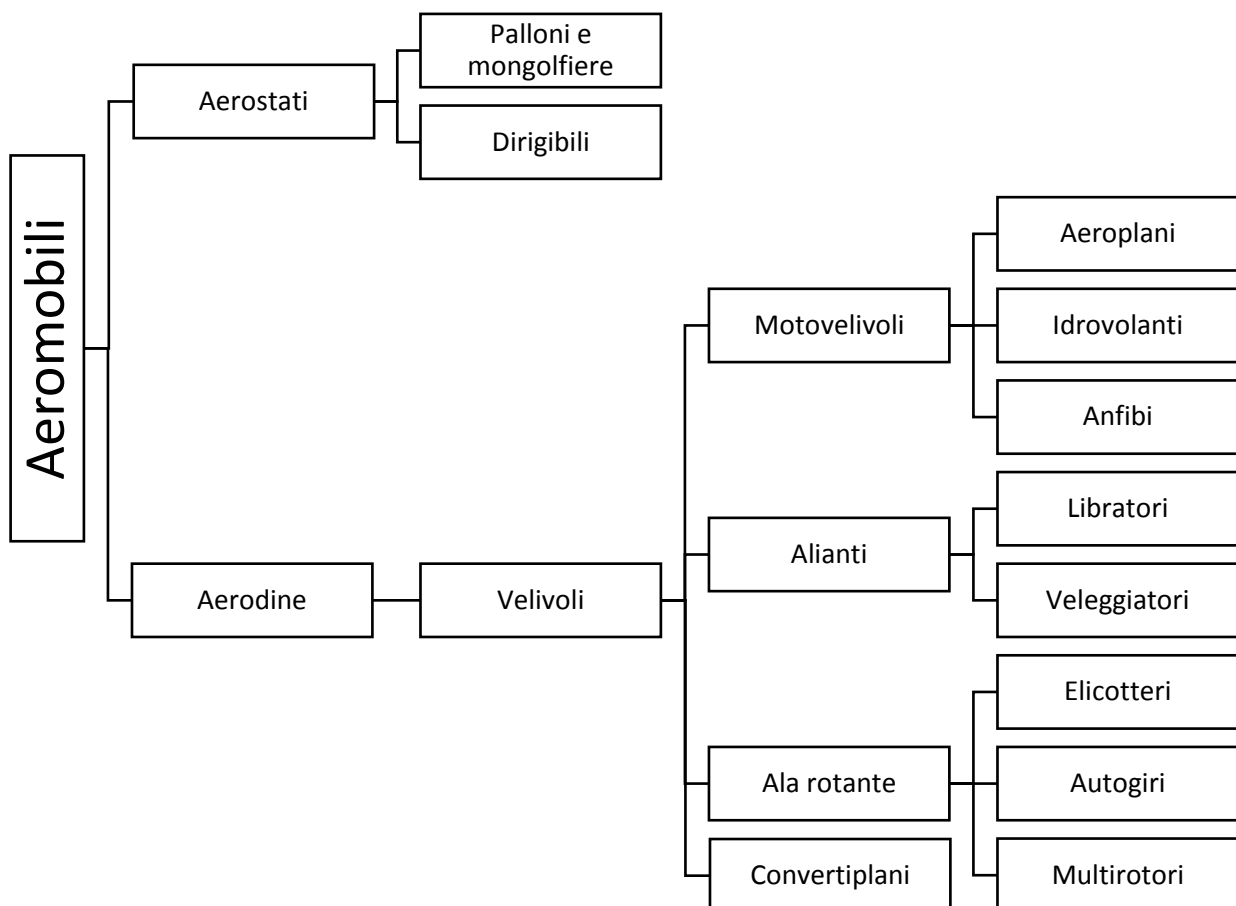
La possibilità di volare è sempre stata una delle massime aspirazioni dell'uomo, alla cui realizzazione si sono dedicate le menti migliori nel corso dei secoli.

Una volta realizzato il primo apparecchio volante, ed è ormai trascorso più di un secolo, lo studio in questo settore si è sempre più specializzato, fino ad arrivare alla realizzazione di apparecchi volanti di svariate forme e dimensioni.

Il primo aeroplano aveva un aspetto rudimentale e prestazioni estremamente modeste. Da questo modello si sono poi sviluppati diversi velivoli, caratterizzati nelle prestazioni e nelle geometrie dal tipo di missione che sono chiamati a svolgere.

A oggi, gli aeromobili possono essere così suddivisi:

Il settore che, nei tempi più recenti, ha avuto il maggiore sviluppo è indubbiamente



*Figura 1 – Tabella di classificazione aerodine
“Meccanica del volo”, CARLO CASAROSA. Pag.4*

quello dei sistemi aeromobili a pilotaggio remoto (S.A.P.R.), comunemente noti anche come “Droni”, dispositivi aerei senza persone a bordo non utilizzati per fini ricreativi

e sportivi (Regolamento enac https://www.enac.gov.it/sites/default/files/allegati/2018-Lug/Regolamento_APR_Ed2_Em4_180704.pdf).

Si parla di pilotaggio remoto perché il pilota di questi apparecchi non si trova a bordo degli stessi, bensì a terra o su un qualunque mezzo che possa ospitare una stazione di controllo.

Questa caratteristica consente ai droni di essere utilizzati in svariati campi, sia militari che civili, fornendo prestazioni di alta qualità senza che venga messa a repentaglio l'incolumità dell'operatore.

A seconda dell'uso al quale sono votati, i droni presentano caratteristiche tecniche e tipologie diverse. Possono, pertanto, essere classificati nelle seguenti categorie

Categoria	Acronimo	Raggio operativo [km]	Quota di volo [m]	Durata del volo [h]	MTOW [kg]	Operativo
Tactical UAV						
Nano	η	< 1	100	< 1	< 0,0250	Sì
Micro	μ	< 10	250	1	< 5	Sì
Mini	Mini	< 10	150 - 300	< 2	< 30	Sì
Close Range	CR	10 - 30	3 000	2 - 4	150	Sì
Short Range	SR	30 - 70	3 000	3 - 6	200	Sì
Medium Range	MR	70 - 200	5 000	6 - 10	1 250	Sì
Medium Range Endurance	MRE	> 500	8 000	10 - 18	1 250	Sì
Low Altitude Deep Penetration	LADP	> 250	50 - 9 000	0,5 - 1	350	Sì
Low Altitude Long Endurance	LALE	> 500	3 000	> 24	< 30	Sì
Strategic UAV						
Medium Altitude Long Endurance	MALE	> 500	14 000	24 - 48	1500	Sì
High Altitude Long Endurance	HALE	> 2 000	20 000	24 - 48	12 000	Sì
Special purpose UAV						
Unmanned combat aerial vehicle	UCAV	1 500	10 000	2	10 000	Sì
Lethal	LETH	300	4 000	3 - 4	250	Sì
Decoy	DEC	0 - 500	5 000	< 4	250	Sì
Stratospheric	STRATO	> 2 000	> 20 000 & < 30 000	> 48	Da definire	Sì
Exo - stratospheric	EXO	Da definire	> 30 000	Da definire	Da definire	No
Space	SPACE	Da definire	Da definire	Da definire	Da definire	No

Figura 2 - Classificazione droni

Il presente studio si occupa, in particolare, dei S.A.P.R. multirottore di massa operativa al decollo inferiore ai 25 Kg, come definiti al punto A dell'articolo 6 del regolamento E.N.A.C. "Mezzi aerei a pilotaggio remoto" Edizione 2 con configurazione a quattro motori (c.d. quadricottero).

Gli elementi essenziali che caratterizzano i multirotori sono:

- Telaio
- Computer di bordo
- Regolatori di giri (E.S.C.)
- Motori
- Eliche

Si tratta, in generale, di dispositivi semplici, in cui le parti meccaniche in movimento sono esclusivamente i motori e le relative eliche; ciò rende tali apparecchi poco soggetti ad usure e rotture meccaniche e, conseguentemente, permette di realizzare una buona economia di gestione.

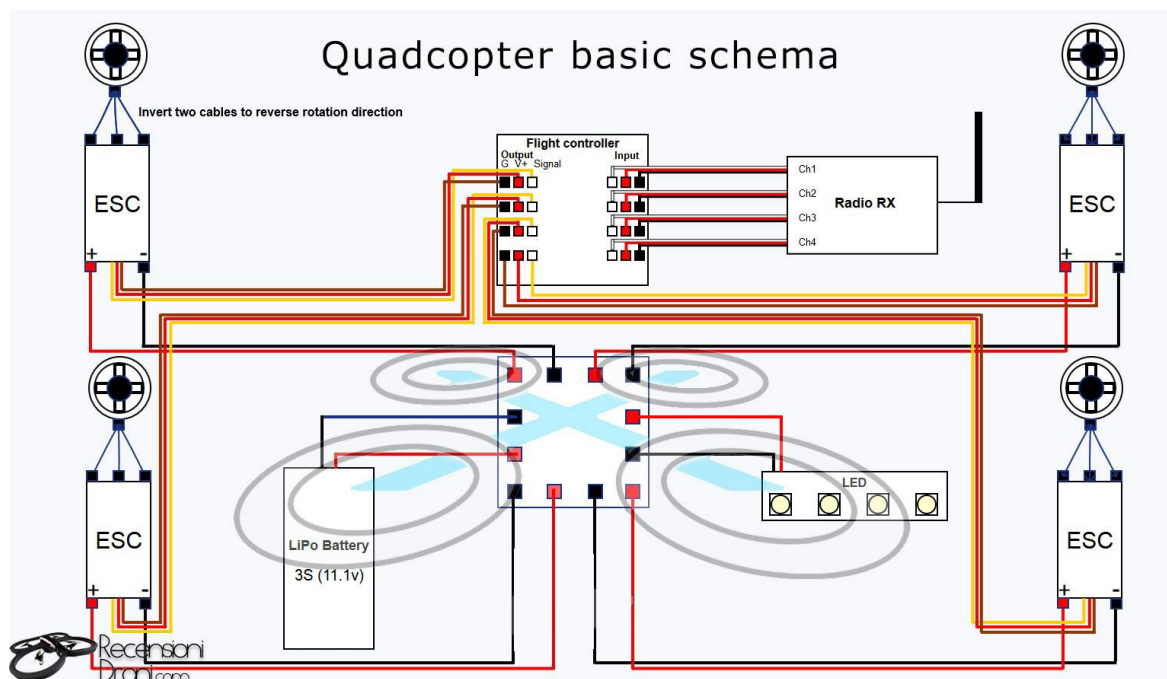


Figura 3 - Schema cablaggio generale quadricottero

Questi multirotori hanno avuto una notevole diffusione negli ultimi tempi in quanto le loro caratteristiche morfologiche e tecniche ne consentono un uso particolarmente performante ed economico.

I punti di maggior forza di queste macchine sono:

- Semplicità di realizzazione

- Basso costo di produzione
- Basso costo di manutenzione
- Ridotte dimensioni
- Modesto peso
- Facilità di trasporto e utilizzo
- Grande versatilità
- Semplicità di addestramento per il pilota

Si tratta di caratteristiche che consentirebbero un grande sviluppo e utilizzo in campo industriale, data l'ampia richiesta del mercato. Detto sviluppo è, però, frenato dal limite derivante dalla attuale insufficiente autonomia di volo, determinata soprattutto dalle ridotte dimensioni delle eliche e dalla bassa densità di energia delle batterie attualmente esistenti.

Si rende, perciò, necessario cercare di ottimizzare le performances di questi dispositivi, utilizzando al meglio i componenti di cui già siamo in possesso.

Uno studio realizzato presso la facoltà di Ingegneria Energetica dell'Università di Oradea, in Romania, ha dimostrato in linea teorica, sfruttando studi al C.F.D., che si può ottenere un incremento della spinta totale del rotore integrando un imbocco attorno e a valle di un'elica.

Questa tesi si propone di verificare empiricamente se tale incremento sia effettivamente realizzabile e se l'aggiunta di peso data dall'imbocco giustifica la sua implementazione.

1. Capitolo 1

In questo capitolo si presentano le trattazioni matematiche che sono alla base dell'aerodinamica che si andrà a studiare. Non sarà una trattazione esaustiva ma servirà per dare un fondamento per potere comprendere meglio ciò che verrà detto nei capitoli successivi.

1.1. Fondamenti di aerodinamica

Per poter affrontare in maniera adeguata l'argomento della tesi senza scendere in approfondimenti dottrinali eccessivamente dispersivi è necessario dare per assunte determinate definizioni ed ipotesi, che sono alla base dell'aerodinamica. Di questi concetti fondamentali, dai quali prende le mosse il nostro studio, verrà dato, pertanto, solo un breve cenno, al fine di rendere la trattazione più completa senza tuttavia procedere ad una analisi esaustiva.

1.1.1. Principio "0" dell'aerodinamica

Il principio zero, detto anche principio di reciprocità, fu introdotto prima da Leonardo da Vinci e, in seguito, anche da Gustave Eiffel.

“Un osservatore esterno può rilevare che le pressioni p e gli sforzi tangenziali τ agenti su un profilo in moto in un fluido in quiete, sono le stesse p e τ che agiscono sul profilo quando questo è in quiete ed è il fluido ad essere in movimento.”

1.1.2. Principio di conservazione della massa

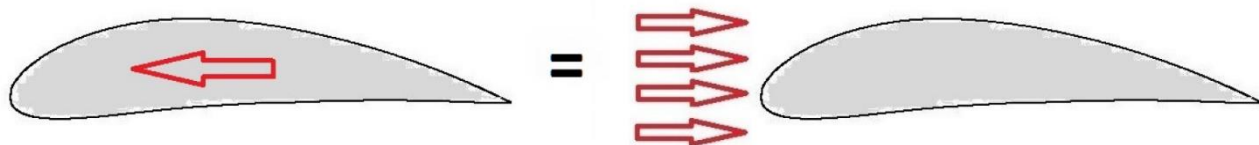


Figura 4 - Principio Zero di Reciprocità

La massa contenuta in un qualunque volume materiale si conserva.

Questo principio, apparentemente banale, afferma che un volume materiale contenente una determinata massa (e le cui pareti non sono permeabili dalla sostanza contenuta), può, in un certo intervallo di tempo Δt , modificare la sua forma senza che la massa al suo interno vari.

Tale principio può essere riscritto in termini matematici nel modo seguente:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \vec{v} = 0$$

1.1.3. Definizione di fluido:

Una elementare distinzione che si può fare, da un punto di vista macroscopico, tra *solido*, *liquido* e *gas* è che il solido ha un ben definito volume e una ben definita forma, un liquido ha un ben definito volume ma non una ben definita forma e, infine, un gas non ha né un ben definito volume né una ben definita forma.

Si tratta di una definizione non particolarmente accurata scientificamente ma utile per dare un'idea di base del discorso che si sta per introdurre.

Se consideriamo la materia come un continuo e non come un insieme di corpi discreti, quali ad esempio molecole o atomi, possiamo ridefinire la distinzione di cui sopra in base alla risposta che gli stati della materia mostrano a fronte di una forza agente su di essi.

Prendiamo in considerazione un punto che giace sul bordo di un volume di una sostanza. Se su di esso agisce una forza, questa può essere sempre divisa in due componenti, una parallela alla superficie su cui poggia (componente tangenziale) e una perpendicolare alla stessa (componente normale). Il diverso effetto delle forze tangenziali sul volume considerato è la caratteristica principale che ci permette di distinguere tra solidi e fluidi (categoria nella quale troviamo sia i liquidi che i gas).

Quando andiamo ad applicare una forza sulla superficie di un corpo solido che si trova in uno stato di equilibrio, il solido andrà a modificare la propria forma, fino a trovare una nuova condizione di equilibrio statico o fino a una rottura. Si può parlare di nuova condizione di equilibrio quando la forza esterna rimane presente ma viene equilibrata dalle forze interne al solido. Una volta che la forza cessa di agire, il solido torna nella condizione iniziale oppure rimane in una condizione intermedia, avendo subito una deformazione plastica. Questo tipo di reazione viene considerato elemento caratterizzante dei solidi ed è definito *modulo di elasticità*, o anche *modello di Young*

Un fluido, invece, reagisce diversamente in quanto, in presenza di una forza tangenziale alla sua superficie, si deforma in maniera dinamica.

Un fluido è in grado di sostenere soltanto uno sforzo normale (perpendicolare) alla sua superficie e tale sforzo si chiama pressione.

In altre parole, possiamo definire un fluido come un materiale (generalmente costituito da una sostanza o da una miscela di più sostanze) che si deforma illimitatamente (fluisce) se sottoposto a uno sforzo di taglio, indipendentemente dall'entità di quest'ultimo; il fluido è un particolare stato della materia che comprende i liquidi, gli aeriformi, il plasma e, in alcuni casi, i solidi plastici.¹

1.1.4. Ipotesi di continuità

Per poter cominciare ad affrontare lo studio della fluidodinamica e, conseguentemente, dell'aerodinamica, si rende necessario introdurre il concetto di *particella di fluido elementare* o semplicemente *particella di fluido*. Per definirla, immaginiamo di voler misurare la densità in un certo punto P nel fluido. Diciamo di voler definire un volume δV di controllo attorno a P e anche di voler misurare la massa δm contenuta in esso, massa che è la somma delle masse di tutte le molecole presenti all'interno del volume nel preciso istante in cui iniziamo la misurazione. La densità media del fluido nel volume considerato sarà perciò

$$\bar{\rho} = \frac{\delta m}{\delta V}$$

Il valore che abbiamo appena definito è tuttavia soggetto a variazioni nel tempo poiché, per come è stato definito, il volume di controllo è permeabile alle molecole del fluido che possono entrarvi e uscirne liberamente. Se, adesso, consideriamo un δV particolarmente grande, il numero delle molecole al suo interno è talmente abbondante che le variazioni nel tempo non sono rilevanti (sono di ordine di grandezza inferiore rispetto al numero medio di molecole presenti). D'altra parte, se andiamo a considerare un volume δV particolarmente piccolo, le variazioni di molecole, istante per istante, non sono più trascurabili e rendono la misura *statisticamente instabile*.

È necessario quindi definire la *particella fluida* come un volume di fluido sufficientemente piccolo da essere considerato infinitesimale rispetto alle misure di spazio di ogni altra quantità macroscopica del sistema, ma sufficientemente grande da

¹ <https://it.wikipedia.org/wiki/Fluido>

contenere un numero di molecole abbastanza elevato da ottenere un valor medio statisticamente stabile.²

In base a quanto precedentemente detto, un fluido non è altro che un insieme molto vasto di elementi che, presi nel loro complesso, vanno a costituire o un liquido o un gas. Nella trattazione matematica di un fluido non è tanto utile lo studio della singola particella fluida quanto lo studio del fluido in generale, come corpo continuo, che si muove e che va a interagire con parti meccaniche (eliche, alettoni, o superfici di altro genere).

Questo modo di operare viene definito *ipotesi di continuità* e, in questa trattazione, considereremo detta ipotesi sempre valida, anche se può apparire eccessivamente semplicistica. La motivazione che giustifica l'ipotesi è che, nella stragrande maggioranza dei casi, il suo utilizzo ci darà buoni risultati con accettabili margini di errore.

All'ipotesi di continuità, leghiamo ora l'*equazione di continuità* o anche *equazione di Leonardo*: questa equazione stabilisce che la portata di fluido attraverso un condotto di sezione variabile resta costante, cosicché al diminuire della sezione aumenta la velocità e, viceversa, all'aumentare della sezione la velocità diminuisce.

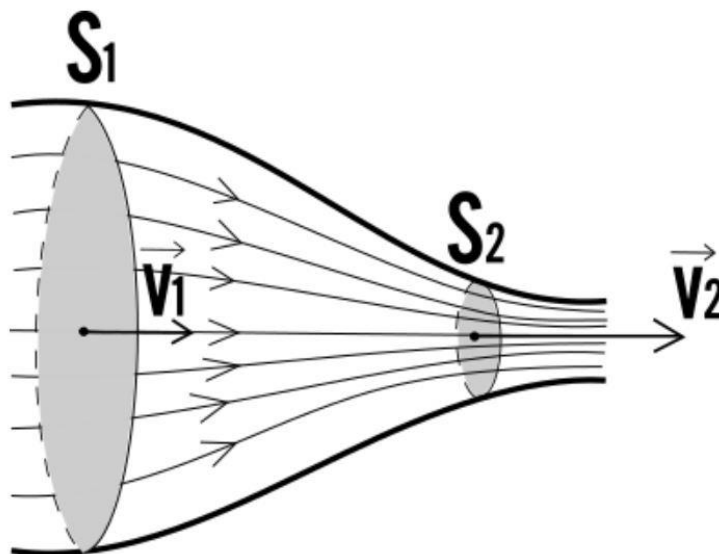


Figura 5 - Principio di conservazione

Se consideriamo le due sezioni in figura, notiamo che esse sono diverse, in particolare $S_1 > S_2$. Nella sezione S_1 il fluido scorre alla velocità v_1 , la portata per definizione è:

$$Q_1 = v_1 S_1$$

² "Elements of Fluid Dynamics", GUIDO BURESTI, Imperial College Press, 2012, pag. 27.

Se si considera ora la sezione S_2 il fluido avrà velocità diversa e una nuova portata:

$$Q_2 = v_2 S_2$$

L'equazione di continuità stabilisce che la portata resta costante, e, dunque, non abbiamo due valori diversi di Q . È possibile, quindi, uguagliare le due portate e scrivere così la formula dell'*equazione di continuità*:

$$v_1 S_1 = v_2 S_2 \text{ (fluido ideale)}$$

Nel caso di fluidi reali, l'equazione di continuità assume una forma leggermente più complessa, stabilendo che anche la portata massica attraverso un condotto di sezione variabile resta costante

$$\rho_1 v_1 S_1 = \rho_2 v_2 S_2 \text{ (fluido ideale)}$$

Se introduciamo l'ipotesi di incomprimibilità (che verrà definita meglio al paragrafo 1.1.5.) nelle condizioni al contorno dei fluidi ideali nonché dei liquidi in generale, si può assumere la densità come costante ($\rho_1 = \rho_2$) e, dunque, la conservazione della portata massica si riduce nuovamente alla conservazione della portata volumetrica.

$$\rho_1 v_1 S_1 = \rho_2 v_2 S_2$$

$$v_1 S_1 = v_2 S_2$$

1.1.5. Ipotesi di incomprimibilità

Un'altra ipotesi che ci permette di semplificare ulteriormente lo studio delle equazioni costitutive dell'aerodinamica è considerare il fluido *non comprimibile*. L'assunzione di questa ipotesi ci consente, infatti, di rielaborare il *principio di conservazione della massa*, rendendolo indipendente dalla densità (come visto al paragrafo precedente).

In seguito ad alcune manipolazioni algebriche possiamo arrivare alla seguente formula:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \vec{V} = 0 \rightarrow \operatorname{div} \vec{V} = 0$$

In questa forma lo ritroveremo al primo posto nel sistema delle equazioni di Navier Stokes.

Questa particolare ipotesi potrebbe sembrare azzardata, visto che è esperienza comune utilizzare bombole o recipienti in genere contenenti gas in pressione ma, di seguito, si dimostrerà che la sua assunzione, entro certi limiti, è assolutamente accettabile.

Sappiamo, infatti, che la velocità del suono è definita come

$$a^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{s=const}$$

Se si considerano isentropiche le trasformazioni subite dall'aria è corretto scrivere

$$p\rho^{-\gamma} = const \rightarrow p = const \rho^\gamma$$

$$\begin{aligned} a^2 &= \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{s=const} \rightarrow \frac{\partial(const \rho^\gamma)}{\partial \rho} = const \gamma \rho^{\gamma-1} = \\ &= const \frac{\gamma \rho^\gamma}{\rho} = \frac{\gamma P}{\rho} \end{aligned}$$

$$\rho = \frac{\gamma}{a^2} P \rightarrow \Delta \rho = \Delta P \frac{\gamma}{a^2} \rightarrow \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta P}{P} \frac{\gamma}{a^2}$$

Prendiamo ora l'equazione di Bernoulli

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = const$$

semplificando il termine relativo alla quota, visto che, per un fluido quale è l'aria, piccole differenze di quota (nell'ordine di qualche metro) sono scarsamente rilevanti, arriviamo all'espressione

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = const$$

che, valutata tra due punti diversi P_1 e P_2 , diventa

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

Differenziando tra i due punti ottengo

$$\Delta P = \frac{1}{2}\rho v^2$$

Sostituendo ora i risultati trovati precedentemente si ottiene

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{1}{2}\gamma \frac{v^2}{a^2} = \frac{1}{2}\gamma M^2$$

Dunque, le variazioni percentuali della densità sono legate proporzionalmente al quadrato del numero di Mach ($M = \frac{v}{a}$). Per la atmosfera standard a livello del mare $a \cong 340 \frac{m}{s}$ e per velocità fino a $v = 100 \frac{m}{s}$ il Mach $M < 0.3 \rightarrow M^2 < 0.09$.

Per velocità non troppo elevate, dato che $\gamma = 1.4$, si ottengono variazioni di densità ρ minori del 10%.

In conclusione, per velocità paragonabili a quelle che saranno oggetto di questo studio, l'ipotesi di fluido incompressibile è accettabile.³

1.1.6. Ipotesi di fluido non viscoso

Introduciamo, infine, l'ultima ipotesi necessaria per completare le basi dello studio: l'ipotesi di fluido non viscoso.

Essa ci consente di semplificare la seconda equazione di Navier Stokes, caratterizzata da termini fortemente non lineari, per arrivare alle equazioni di Eulero. Tali equazioni

³ "Appunti di Aerodinamica degli Aeromobili", ALESSANDRO TALAMELLI, 2015/2016.

sono preferibili, in prima analisi, in quanto perdono il termine non lineare e sono quindi più facilmente prevedibili e analizzabili. In termini matematici abbiamo:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \operatorname{grad} \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \nabla^2 \vec{v}$$

che diventa

$$-\nabla p + \rho g = \rho \frac{d\vec{v}}{dt}^4$$

Come si può vedere la notazione è decisamente più leggera.

1.2. Elica aeronautica

1.2.1. Introduzione all'elica

L'elica aeronautica, che è il tipo di elica che esamineremo in questo studio, è uno dei principali e più consolidati tipi di organi propulsori per i mezzi aerei. Nello specifico, è un particolare tipo di ala, il cui moto è una composizione di un moto rotazionale, generato dall'albero del motore su cui è vincolata, e di un moto traslazionale della stessa nel fluido in cui è immersa (aria, nell'ambito aeronautico).

Essa è costituita da un mozzo su cui sono calettate due o più pale, le quali, come accennato sopra, una volta messe in rotazione generano portanza o, più correttamente, spinta T .

Lo scopo è quello di riuscire a trasferire la potenza del motore detta *potenza all'albero* P_a in *potenza disponibile all'elica* P_d . La prima è generata dalla coppia del motore C per la velocità angolare ω perciò

$$P_a = C \omega$$

la seconda, invece, è definita come il prodotto scalare tra la spinta T per la velocità di volo V_∞

$$P_d = T V_\infty$$

⁴ "Appunti di Aerodinamica degli Aeromobili", ALESSANDRO TALAMELLI, 2015/2016.

1.2.2. Geometria

La geometria di un'elica, come è intuitivo, si ripete per ciascuna delle pale che la compongono. Il diametro D dell'elica è dato dalla somma della lunghezza di due pale opposte, a cui si aggiunge il diametro del mozzo. Detto diametro è, altresì, definito *disco battuto dell'elica*.

In un'elica, la parte del mozzo è l'unica che non contribuisce a generare una spinta; in conseguenza di ciò, detto r_m il raggio del mozzo, ciascuna pala ha apertura $b_p = R - r_m$ (con $R = \frac{D}{2}$)

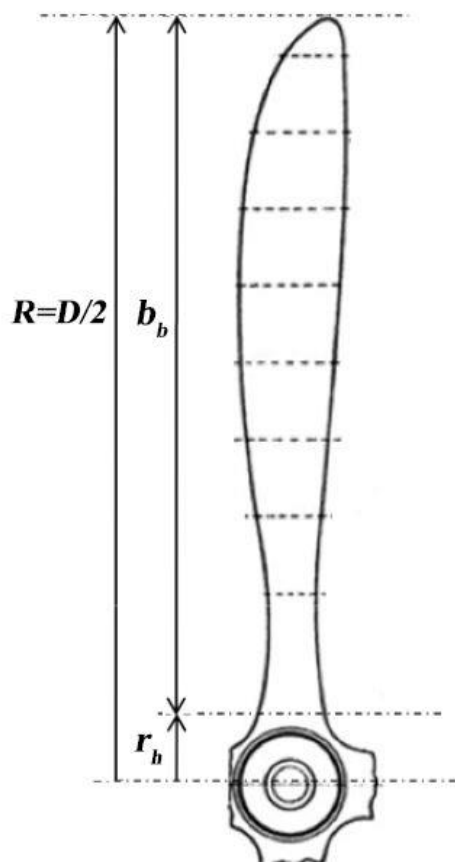


Figura 6 - Schema pala

Le pale, costituite da profili alari (la cui lunghezza è definita *corda*), sono descritte da alcuni parametri caratterizzanti:

- distribuzione dei profili alari lungo l'ascissa radiale $r_m < r < R$
- distribuzione delle corde dei profili $c(r)$
- distribuzione dell'angolo di calettamento dei profili $\beta(r)$

$\beta(r)$ è definito come l'angolo formato dall'asse della corda del profilo rispetto al piano del disco battuto dell'elica.

Il calettamento della pala β è, per convenzione, il calettamento al 75% del raggio R e viene indicato con $\beta_{0.75}$.

Si definisce, inoltre, passo geometrico (p_g) la distanza di avanzamento teoricamente percorsa dall'elica in una rivoluzione completa, trascurando gli effetti di comprimibilità del fluido. La formula per calcolare p_g , noto l'angolo di calettamento geometrico β e il diametro D , è

$$p_g(r) = 2 \pi R \tan \beta (r)$$

Nonostante negli anni si siano sviluppate eliche specifiche per diverse applicazioni, andando a specializzare i parametri sopra definiti, si può notare che tutte le pale presentano caratteristiche simili, e precisamente:

- la corda tende inizialmente a crescere per poi o ridursi alle estremità o mantenersi costante.
- lo spessore dei profili si va riducendo dalla radice fino alle estremità o si mantiene costante.
- l'angolo di calettamento β tende a ridursi dalla radice della pala alle estremità, in maniera da compensare l'incremento di velocità tangenziale dovuto al raggio. L'intenzione è quella di generare una spinta costante lungo tutta la lunghezza della pala e, poiché la velocità tangenziale all'estremità è obbligatoriamente più alta di quella alla radice ($v_{tg} = \omega R$), è necessario ridurre β per mantenere costante la velocità del flusso mosso dall'elica al variare di R .

Gli elementi di similitudine di cui sopra non sono casuali ma dettati da necessità strutturali e aerodinamiche. Le medesime filosofie sono state adottate anche nell'ambito navale, in quanto le eliche seguono i medesimi principi, nonostante il fluido abbia caratteristiche di densità e peso specifico profondamente diverse.

1.2.3. Coefficienti adimensionali

È conveniente, a questo punto, definire i parametri a cui si farà riferimento durante i test, parametri che serviranno per la valutazione delle prestazioni dei sistemi propulsivi presi in esame:

- *Advance Ratio* o *Rapporto di funzionamento*, J :

$$J = \frac{V_\infty}{N D}$$

Essendo $D = 2 R$, $\omega = 2 \pi N$, si hanno le forme alternative

$$J = \pi \frac{V_\infty}{\omega R} = \pi \frac{V_\infty}{v_t(R)}$$

Il *rapporto di funzionamento* può essere definito anche come *passo adimensionale dell'elica*

- *Thrust coefficient* o *coefficiente di spinta*, T_c :

$$T_c = \frac{T}{\rho N^2 D^4}$$

- *Torque coefficient* o *coefficiente di coppia*, Q_c :

$$Q_c = \frac{Q}{\rho N^2 D^5}$$

- *Power coefficient* o *coefficiente di potenza*, P_c :

$$P_c = \frac{C \omega}{\rho N^3 D^5}$$

- *Propulsive efficiency* o *rendimento propulsivo*, η_p , definito come il rapporto fra potenza disponibile e potenza all'albero

$$\eta_p = \frac{P_d}{P_a} = \frac{T V_\infty}{C \omega}$$

Il rendimento propulsivo è un indice adimensionale particolarmente utile perché lega il coefficiente di spinta e di potenza in un'unica espressione:

$$\eta_p = \frac{T V_\infty}{2\pi Q N} = \frac{\rho N^2 D^4 T_c}{\rho N^2 D^5 Q_c} \frac{J D}{2\pi} = \frac{J}{2\pi} \frac{T_c}{Q_c}$$

Le curve $T_c(J)$ e $P_c(J)$ (o equivalentemente $Q_c(J)$) e $\eta_p(J)$ vengono dette curve caratteristiche dell'elica; sono il modo più sintetico per definirne le prestazioni e per trovare il miglior accoppiamento tra elica e motore.

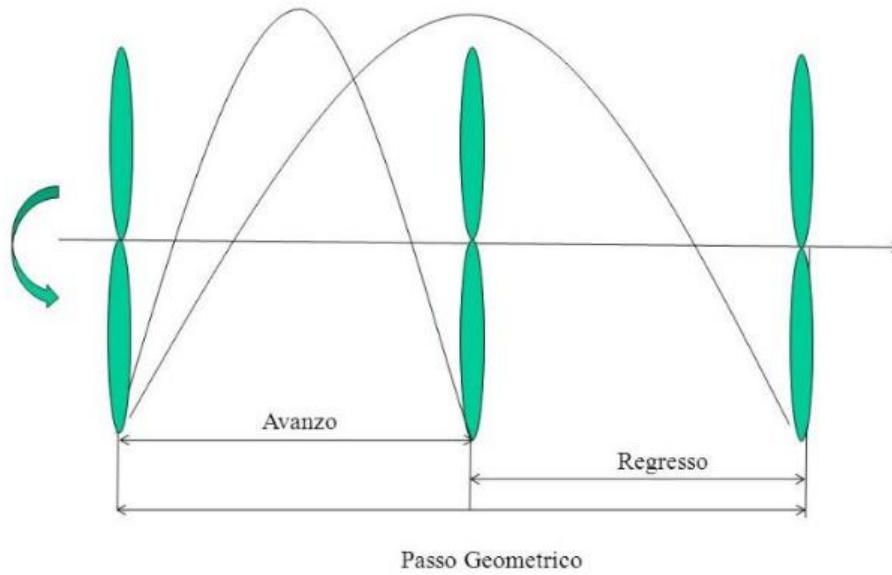
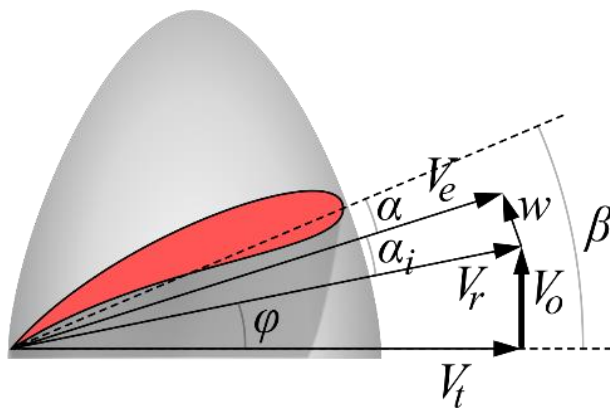


Figura 7 - Passo geometrico e passo effettivo



β è l'angolo di calettamento geometrico;
 α è l'angolo d'attacco;
 α_i è l'angolo di incidenza indotta;
 V_t è la velocità di rotazione della sezione d'elica;
 V_o è la velocità di moto;
 V_r è la velocità relativa;
 V_e è la velocità effettiva;
 w è la velocità indotta

Figura 8 - Angoli dell'elica

1.3. Teoria del disco attuatore in moto assiale

La teoria che è stata utilizzata per valutare il funzionamento di un rotore nelle condizioni di volo in salita, in discesa e a punto fisso (hovering) è la *teoria del disco attuatore in moto assiale*. Essa permette di determinare la velocità indotta al disco attuatore.

È necessario introdurre 3 ipotesi:

1. Fluido incomprimibile;
2. Fluido non viscoso;
3. Disco con infinito numero di pale;

Si definiscono ora le condizioni a monte: P_0, ρ .

Velocità corrente indisturbata: v_0 .

Al disco sulla faccia superiore: p_1, v_1 .

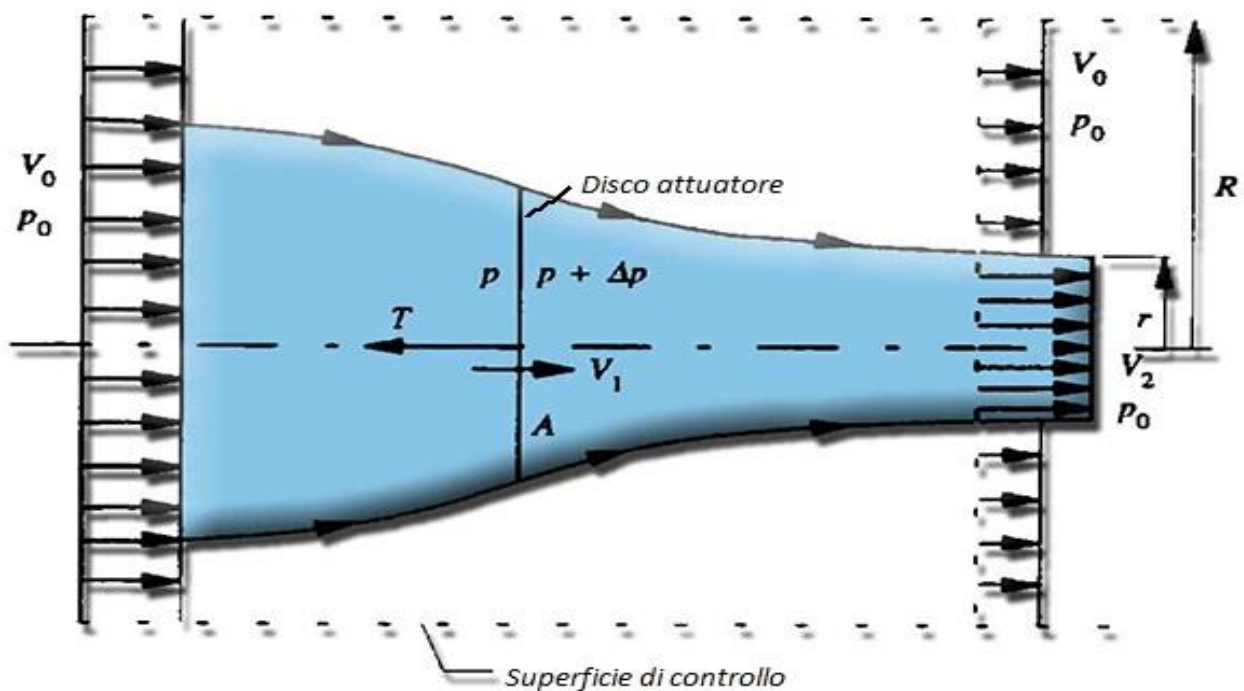


Figura 9 - Schema disco attuatore

Al disco sulla faccia inferiore la pressione vale $p_1 + \Delta p$, e la velocità v_1 . Nella corrente a valle si abbia $p = p_0$, la velocità v_2 . Per il teorema della Q.d.M. data la superficie di controllo in figura (Figura 9)

$$T = \rho A V_0 (V_2 - V_0)$$

Poiché il disco attuatore genera un salto di pressione Δp , scrivo l'equazione dell'energia (Bernoulli) a monte e a valle del disco

$$p_0 + \rho \frac{v_0^2}{2} = p_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} \quad \text{a monte,}$$

$$p_1 + \Delta p + \rho \frac{v_1^2}{2} = p_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} \quad \text{a valle.}$$

Essendo per l'equazione di continuità:

$$\rho A_1 v_1 = \rho A_0 v_0 = \rho A_2 v_2$$

si può scrivere

$$T = A \Delta p = \rho \frac{v_2^2 - v_0^2}{2} A = \rho A v_1 (v_2 - v_0)$$

da cui si ricava

$$v_1 = \frac{v_2 - v_0}{2}$$

e, con le seguenti posizioni: $v_1 = v_0 + w$ $v_2 \approx v_0 + w'$,

si ricava

$$w = \frac{w'}{2} \rightarrow w' = 2w .$$

Essendo la velocità a valle il doppio della velocità al disco, si può scrivere, per la trazione del rotore:

$$T = \rho A (v + w) 2w$$

Nel caso di volo stazionario ($v=0$)

$$w_h = \sqrt{\frac{T}{2\rho A}} \quad (\text{Hovering } w = w_h)$$

Nel volo in salita con velocità verticale v abbiamo:

$$vw + w^2 - w_h^2 = 0$$

$$w = -\frac{v}{2} \pm \sqrt{\frac{v^2}{4} + w_h^2}$$

$$\frac{w}{w_h} = -\frac{v}{2w_h} \pm \sqrt{\frac{v^2}{4w_h^2} + 1}$$

Infine, la potenza spesa per la salita vale:

$$P_i = T(v + w) = A\rho(v + w)^2 2w \cdot^5$$

⁵ "PROPULSIONE DEGLI ELICOTTERI", VITTORIO FIORINI, Istituto Bibliografico Napoleone, 2003, pag. 11

1.5. Elica intubata

Il primo a ideare il concetto di *elica intubata* in ambito aeronautico fu l'ingegner Stipa, intorno ai primi anni Trenta. Lo Stipa-Caproni (soprannominato ironicamente aereo-botte) fu il primo prototipo di aereo con propulsione a elica intubata e può essere considerato l'antenato degli odierni motori a getto.

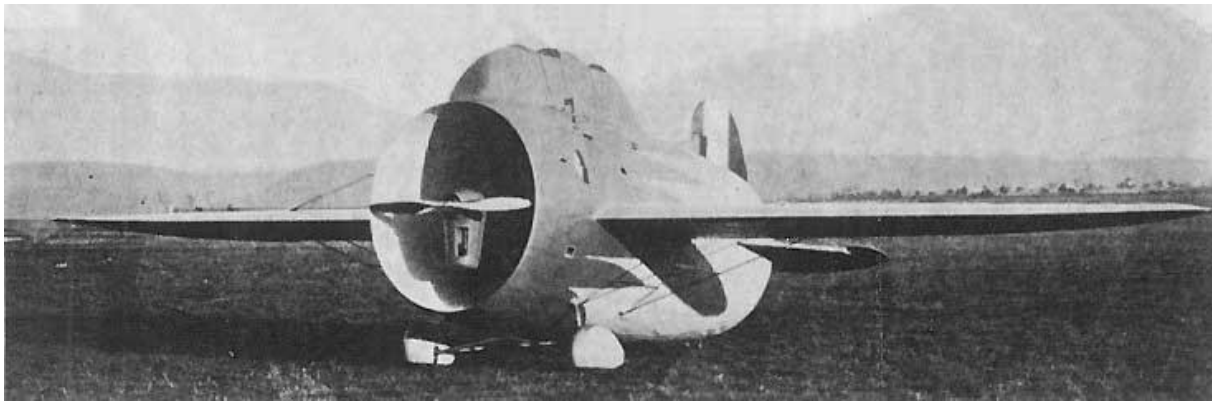


Figura 10 - Aeromobile Stipa Caproni

L'ingegner. Stipa, con questo progetto, cercò di sfruttare al massimo la modesta potenza che i motori dell'epoca riuscivano ad erogare, cercando di minimizzare le perdite.

La sua idea fu quella di porre un condotto, adeguatamente sagomato, intorno all'elica. I vantaggi che si possono ottenere con questa particolare configurazione sono principalmente tre:

1. Le perdite di carico causate dal flusso d'aria che risale il gradiente di pressione dalle estremità delle pale vengono ridotte sensibilmente, riducendo lo spazio tra il condotto e l'elica;
2. Un condotto dalla geometria ben studiata genera, grazie a precisi andamenti delle pressioni, una componente di spinta che va a contribuire alla propulsione del mezzo;
3. Il motore, appositamente collocato a valle dell'elica, rilasciando calore dal circuito di raffreddamento, aumenta l'energia interna del fluido. L'energia termica ottenuta incrementa la pressione del fluido all'interno del condotto ($T p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = cost$, legge di Poisson); tale pressione può essere rilasciata solo seguendo il flusso d'aria spinto dall'elica, che viene, quindi, diretto all'uscita del condotto, generando un ulteriore incremento di spinta.

L'efficienza con cui una macchina termica sfrutta il calore, in generale, è data dal *rendimento di Carnot* e si basa su una formula piuttosto semplice $\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h}$ dove T_h è la temperatura che il fluido raggiunge una volta scaldato dal motore mentre T_c è la temperatura dell'aria esterna. Si osserva che questo rendimento è sempre compreso tra zero e uno, e, inoltre, che maggiore è il divario tra le due temperature maggiore è il rendimento. Se T_h è particolarmente elevata, è possibile ottenere alti valori di rendimento, ma, conseguentemente, si rende necessario raffreddare considerevolmente il motore per evitare che esso possa fondersi; il calore sottratto al motore è quello che viene descritto e sfruttato al punto 3.

Ad eccezione dello Stipa Caproni e di poche altre macchine, il calore rilasciato dal circuito di raffreddamento di un motore non viene utilizzato. Il rendimento ottenibile sfruttando questo calore in una macchina termica sarebbe così basso da non giustificare l'utilizzo (si parla di *energia degradata*).

Le macchine a combustione interna, infatti, hanno un rendimento non particolarmente elevato, in quanto buona parte dell'energia contenuta nel carburante viene trasformata in energia termica, che, però, non prende parte allo sviluppo di potenza.

I motori elettrici, invece, hanno un rendimento superiore alle macchine termiche poiché trasformano poca energia elettrica in calore. Il divario di temperature sarebbe talmente piccolo da non generare alcun aumento di energia del fluido e, di conseguenza, non ci sarebbe nessun aumento di pressione da poter sfruttare.

Il nostro studio si concentrerà, pertanto, unicamente sui primi due effetti sopra esposti.



Figura 11 - Particolare del gruppo propulsivo dello Stipa Caproni

2. Capitolo 2

In questo capitolo verranno descritti i componenti meccanici ed elettronici che saranno utilizzati nel corso della sperimentazione eseguita.

2.1. Motore elettrico

I droni, nella maggioranza dei casi, sono equipaggiati da motori elettrici e ciò per ragioni di peso, dimensioni e rumorosità, fatta eccezione per gli U.A.V. militari da ricognizione ad ala fissa, che, normalmente, sono dotati di motori a combustione interna al fine di ottenere un tempo di missione più lungo.

I motori elettrici, ampiamente utilizzati in ogni tipo di ambito, solo di recente sono stati introdotti in ambito aeronautico per scopi propulsivi. In ambito aeronautico, infatti, essi erano relegati esclusivamente alla deflessione di superfici mobili di controllo, movimentazione dei carrelli o come attuatori per pompe idrauliche. Ciò dipendeva dal fatto che non esistevano batterie sufficientemente leggere e con una elevata densità di energia che giustificassero l'impiego di tali motori a fronte di prestazioni assolutamente insufficienti.

Con i recenti progressi nel campo chimico ed elettronico è indubitabile che, in un futuro non troppo lontano, vedremo la propulsione elettrica prendere sempre più piede, come, peraltro, già sta accadendo in ambito automotive da alcuni anni a questa parte.

Andiamo adesso a vedere la suddivisione dei motori elettrici e i loro principi di funzionamento.

2.1.1. Motori elettrici D/C

I motori elettrici a corrente continua (D/C) sono macchine costituite principalmente da due parti:

- Parte statorica
- Parte rotorica

La parte statorica è quella parte del motore che rimane ferma ed è collegata al telaio. In essa, in genere, troviamo due magneti permanenti con polarità opposte, chiamati

statori, che generano un campo magnetico fisso e costante nonché due spazzole per il collegamento elettrico con il rotore.

La parte rotorica è invece la parte in rotazione del motore. È costituita dall'albero su cui sono avvolti due o più solenoidi e su cui è presente, inoltre, un commutatore a più facce aventi la medesima superficie. A ciascuno dei solenoidi è collegata una faccia del commutatore. Il commutatore riceve corrente dalle due spazzole in rame e carbonio, che si trovano sullo statore e che sono collegate all'alimentazione dell'impianto (generatore elettrico o batteria). Quando le spire dei solenoidi sono percorse da corrente generano un campo magnetico che va a interagire con quello già presente, generato dai magneti permanenti, mettendo in rotazione l'albero. Quando i due campi stanno per allinearsi, le spazzole passano su altre due facce del commutatore, invertendo la polarità del campo magnetico nei solenoidi e mantenendo così in rotazione il sistema. Tale processo è ripetuto fin quando non si smette di fornire energia alle spazzole.



Figura 13 – Motore D/C

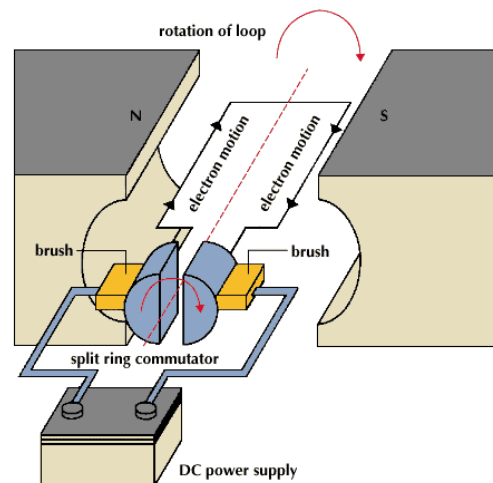


Figura 12 - Schema funzionamento motore D/C

2.1.2. Motori elettrici A/C

Allo stesso modo dei motori a corrente continua, i motori a corrente alternata presentano una parte statorica e una parte rotorica. Tuttavia, a causa del tipo di alimentazione A/C, questi motori non possono avere un commutatore di tensione meccanico, bensì necessitano di un commutatore elettronico.

Il modo in cui il regolatore gestisce la frequenza angolare della tensione ci permette di suddividere i motori A/C in due categorie:

- Motori sincroni: I motori sincroni hanno un periodo di rotazione che è sincronizzato con la frequenza della tensione di alimentazione (solitamente

trifase). Nel rotore troviamo diversi magneti permanenti con polarità alternata, mentre nello statore troviamo gli avvolgimenti collegati al circuito di alimentazione. Nel momento in cui il regolatore di tensione entra in funzione, gli avvolgimenti generano un campo magnetico rotante, che trascina i magneti nel rotore, azionando la macchina.

L'avvio di questo motore è, però, abbastanza complesso: a causa del suo principio di funzionamento, per azionarlo da fermo è necessario un secondo motore di avviamento (un motore D/C, ad esempio) perché, per motivi di inerzia, il campo magnetico rotante non ha il tempo di mettere in rotazione l'albero. Il motore D/C si occupa, quindi, unicamente di portare a regime il rotore.

- Motori asincroni: I motori asincroni in corrente alternata sono motori in cui la frequenza di rotazione non è uguale o un sottomultiplo della frequenza di rete, ovvero non è "sincrona" con la rotazione del campo magnetico. La geometria di costruzione di questi motori è molto simile alla precedente ma, nel caso di motore trifase, il numero di spire è un multiple di tre.

Questi motori, a differenza dei precedenti, sono utilizzati in tutti gli ambiti industriali grazie alla loro estrema affidabilità e robustezza. L'assenza di spazzole consumabili riduce al minimo la manutenzione e, inoltre, impedisce la creazione di scintille dannose ai circuiti.

I motori asincroni sono alimentati da regolatori, che permettono di variare in modo coordinato sia la frequenza che la tensione. A seconda del tipo di corrente proveniente dal circuito di alimentazione, è sempre possibile mettere in moto un motore asincrono, utilizzando il giusto tipo di commutatore.

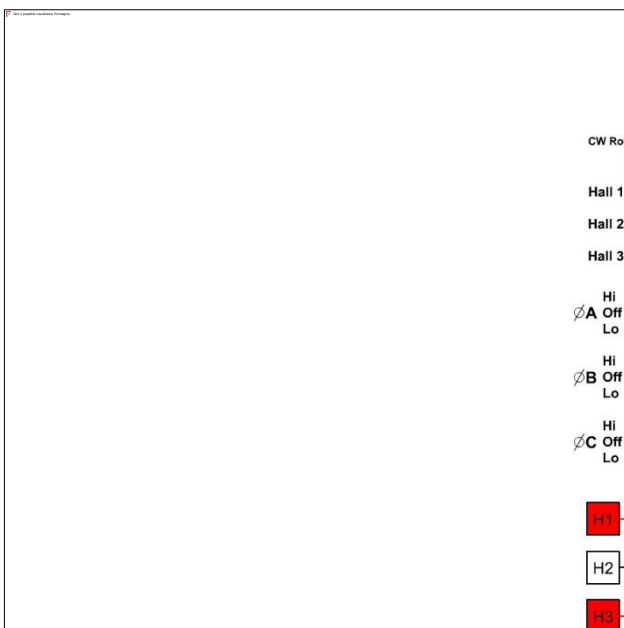


Figura 14 – Motore A/C

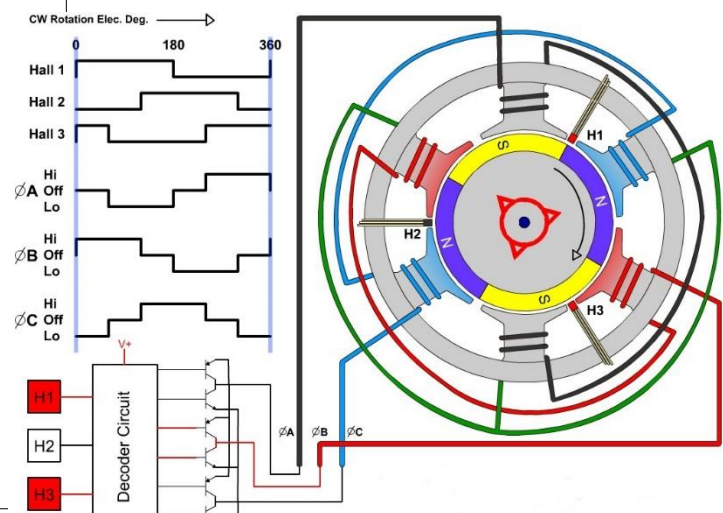


Figura 15 – Schema di funzionamento motore A/C

2.1.3. Motore utilizzato nei test



Figura 16 – T MOTOR Antigravity 4006 KV 380

Il motore che è stato utilizzato durante la sperimentazione è un motore asincrono alimentato in corrente continua. È, infatti, un motore senza spazzole (*Brushless*) con campo magnetico rotante la cui geometria si differenzia leggermente da quelle sopra descritte, in quanto troviamo i poli magnetici fissi nella parte del rotore e gli avvolgimenti nello statore. Tale configurazione, tipica nel mondo del modellismo dinamico, è detta *Outrunner* e garantisce un buon raffreddamento del motore ed una grande coppia all'albero, anche a bassi numeri di giri.

Poiché i droni sono alimentati a batteria, e quindi a corrente continua, è necessario immettere nel circuito anche un inverter (E.S.C.) che trasformi la corrente in alternata. Tale componente verrà descritto al paragrafo 2.2.2.

Il motore oggetto di studio è il modello Antigravity 4006 KV 380, della casa T-MOTOR.

Le due cifre che si trovano a fianco della parola Antigravity sono i valori che definiscono la geometria e le caratteristiche del motore:

- 4006 è il valore che indica le dimensioni del motore ed è da suddividere in due cifre distinte:
 - i primi due numeri, in questo caso 40, indicano il diametro esterno del motore, espresso in millimetri;
 - gli altri due numeri variano il loro significato in base alla casa produttrice: in alcuni casi, esprimono l'altezza degli avvolgimenti, espressa in millimetri (altezza intesa come misura parallela all'albero), in altri casi, esprimono, invece, l'altezza del motore, sempre espressa in millimetri, misurata a partire dal punto in cui il motore si attacca al supporto-motore fino al punto in cui poggia l'elica.

- Le due cifre che seguono la sigla "KV" indicano, invece, il numero di giri al minuto (r.p.m.) del motore per il numero di volt forniti al motore stesso. In questo caso, quindi, se consideriamo una batteria da 24 V, avremo un numero di giri circa pari a: $380 \text{ [KV]} \times 24 \text{ [V]} = 9120 \text{ r.p.m.}$

Nella tabella nella pagina seguente è possibile trovare i dati tecnici e le prestazioni che la casa produttrice del motore presenta. Si fa presente che i dati non sono confrontabili con quelli ottenuti in questo studio poiché sono stati ottenuti con un'elica diversa.

Load Testing Data										
Ambient Temperature			/		Voltage			DC Power Supplier		
10	Voltage (V)	Prop	Throttle	Current (A)	Power (W)	Thrust (G)	RPM	Efficiency (G/W)	Torque (N*m)	Operating Temperature (°C)
Antigravity 4006 KV380	24	T-MOTOR 13*4.4CF	50%	2	48.00	544	3719	11.33	0.096	30
			55%	2.5	60.00	656	4528	10.93	0.108	
			60%	3.1	74.40	753	4840	10.12	0.123	
			65%	3.7	88.80	853	5155	9.61	0.139	
			75%	5.1	122.40	1062	5451	8.68	0.172	
			85%	6.8	163.20	1286	6327	7.88	0.208	
			100%	9.7	232.80	1633	6515	7.01	0.267	
		T-MOTOR 14*4.8CF	50%	2.4	57.60	675	3961	11.72	0.116	37
			55%	3.2	76.80	798	4329	10.39	0.139	
			60%	3.8	91.20	908	4619	9.96	0.159	
			65%	4.7	112.80	1033	4925	9.16	0.179	
			75%	6.5	156.00	1286	5485	8.24	0.222	
			85%	8.5	204.00	1576	6004	7.73	0.268	
			100%	12.2	292.80	1975	6731	6.75	0.338	
		T-MOTOR 15*5CF	50%	3.1	74.40	805	3746	10.82	0.152	46
			55%	4.1	98.40	959	4089	9.75	0.178	
			60%	4.8	115.20	1093	4358	9.49	0.203	
			65%	5.8	139.20	1236	4634	8.88	0.229	
			75%	8.3	199.20	1561	5215	7.84	0.285	
			85%	10.7	256.80	1823	5627	7.10	0.334	
			100%	15	360.00	2228	6177	6.19	0.404	
		T-MOTOR 16*5.4CF	50%	3.7	88.80	928	3495	10.45	0.187	HOT
			55%	4.8	115.20	1096	3817	9.51	0.221	
			60%	5.9	141.60	1258	4079	8.88	0.252	
			65%	7.2	172.80	1427	4326	8.26	0.285	
			75%	10	240.00	1740	4803	7.25	0.343	
			85%	12.9	309.60	1970	5119	6.36	0.388	
			100%	17.5	420.00	2309	5445	5.50	0.447	

Figura 17 - Tabella dati Antigravity 4006

2.2. Regolatore di giri E.S.C.

I regolatori di velocità o E.S.C. (Electronic Speed Controller) sono componenti elettronici necessari per la gestione dei motori elettrici. Il compito principale dei regolatori di velocità è quello di gestire la velocità angolare dell'albero del motore; a questo possiamo aggiungere anche:

- Gestione della tensione in entrata al circuito. Il regolatore modifica la gestione della potenza in uscita in base al numero di Volt che misura;
- Funzione di B.E.C. (Battery Elimination Circuit). Consente di sfruttare la tensione in entrata, anche se di voltaggio superiore al necessario, convertendola ad una tensione e amperaggio necessaria per alimentare i circuiti elettronici del mezzo;
- Protezione delle batterie. Se il voltaggio delle batterie scende sotto una certa soglia, si può creare un rischio di incendio. A scopo preventivo, il circuito taglia la potenza al motore, anche a costo di sacrificare il mezzo (nel caso di velivolo);
- Settaggio freno motore. In certe applicazioni, come nel caso di velivoli ad ala fissa, è possibile impostare il regolatore in modo che blocchi l'elica o la lasci libera di ruotare, nel caso si tolga potenza al motore. In base alle dimensioni dell'elica, questo settaggio può essere molto utile per evitare di rallentare troppo il mezzo, ad esempio in fase di atterraggio.
- Rapidità con cui erogare potenza al motore. È possibile impostare con quanta rapidità il regolatore presenterà il comando al motore. In base al tipo di motorizzazione, elica e mezzo, può essere utile avere una risposta più pronta e aggressiva o più lenta e graduale.

Anche per i regolatori di velocità è possibile operare una distinzione in base al tipo di corrente (continua o alternata) necessaria per il funzionamento del motore, analogamente a quanto è stato fatto per i motori.

Esistono necessariamente gli E.S.C. per motori a corrente continua e quelli per motori a corrente alternata e di seguito si descriveranno i principi di funzionamento.

2.2.1. Regolatori per motori D/C

I motori a corrente continua sono, in generale, più semplici da gestire: se si volesse metterli in funzione a velocità costante, basterebbe fornire loro la tensione e la corrente necessaria per raggiungere il numero di giri richiesto e, al più, un interruttore di accensione e spegnimento (gran parte dei macchinari industriali lavora esattamente in questo modo).

Diversamente, a parità di tensione in ingresso, se si vuole poter variare il numero di giri dell'albero, è necessario introdurre un regolatore che possa essere alimentato o in corrente continua o in alternata e possa trasmetterla al motore, modulandola propriamente. È necessario, inoltre, un sistema che possa elaborare un segnale P.W.M. o simile, proveniente dal pilota o dal computer di bordo per valutare quanta energia erogare al motore. Il collegamento al motore è realizzato con due cavi che consentono di portare la corrente continua alle spazzole del motore.



Figura 18 - Regolatore di giri per motori D/C

2.2.2. Regolatore per motore A/C

I motori a corrente alternata necessitano obbligatoriamente di un regolatore di velocità per poter gestire la velocità di rotazione del campo magnetico nelle spire. Anche in questo caso, il regolatore è preposto non solo alla regolazione della velocità di rotazione dell'albero del motore ma anche allo svolgimento delle medesime funzioni secondarie sopra descritte per il regolatore D/C.

La regolazione della velocità di rotazione è ottenuta trasformando la corrente in entrata al regolatore in corrente alternata trifase, modulata per il numero di giri richiesto. Questa corrente deve essere variabile sia in intensità che in frequenza per poter gestire la variazione di velocità angolare che, come nel caso precedente, il pilota o il F.C. può richiedere al motore. Tipicamente, in un regolatore brushless, troveremo i cavi di alimentazione in entrata, un sistema che possa elaborare un segnale P.W.M. per valutare quanta energia erogare al motore e, infine, tre cavi che, dal regolatore, portano la corrente ai tre avvolgimenti all'interno del motore.



Figura 19 - Regolatore di giri per motori A/C

Per transitare il comando che il pilota o il flight controller vogliono trasmettere al motore, è necessario che esso venga tradotto in un segnale digitale che un circuito possa interpretare. Tale “traduzione” viene effettuata utilizzando la modulazione di larghezza di impulso (Pulse-Width Modulation, P.W.M.).

Essa utilizza degli impulsi di tensione di lunghezza variabile nel tempo. La durata dell’impulso è tradotta dal regolatore in un comando al motore: maggiore è la lunghezza dell’impulso, maggiore è la potenza trasferita al motore e, conseguentemente, maggiore è la velocità angolare del motore. La lunghezza dell’impulso P.W.M. può variare da un valore minimo di 1000 μ s a un valore massimo di 2000 μ s; il valore minimo si traduce con lo 0% di energia erogata al motore, mentre il valore massimo si traduce con il 100% di energia erogata al motore. In conseguenza di quanto sopra, i valori intermedi di lunghezza di impulso genereranno percentuali intermedie di potenza al motore.

La quantità di corrente che l’E.S.C. fornisce agli avvolgimenti è gestita da un componente elettronico chiamato M.O.S.F.E.T. (Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor). Questo transistor sfrutta un particolare fenomeno fisico, detto effetto di campo per regolare il passaggio di corrente. Ciascun Mosfet può essere collegato in

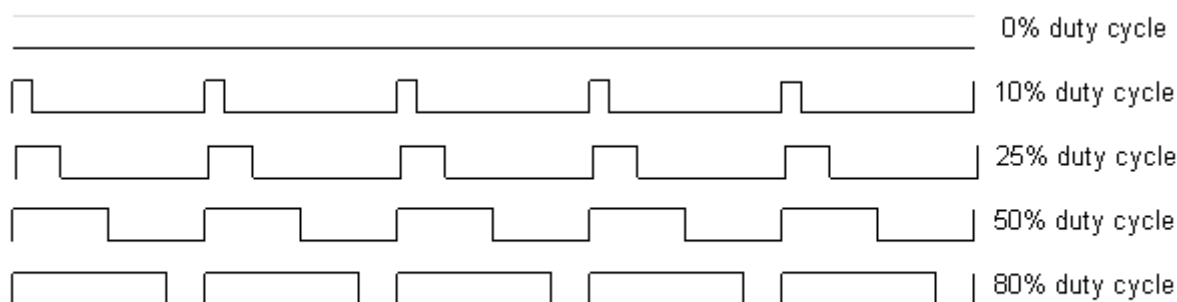


Figura 20 - Modulazione PWM, variazione di lunghezza dell'impulso

parallelo con altri per realizzare ESC in grado di gestire correnti e tensioni maggiori. Chiaramente maggiore è il valore di corrente che un regolatore può supportare, maggiore è il costo del componente.

2.2.3. Regolatore utilizzato

Il regolatore che è stato accoppiato al motore, durante questa sperimentazione, è il T-Motor T40A.

Questo regolatore E.S.C. è stato scelto in base ai seguenti criteri:



Figura 21 - Regolatore TMotor T40 A

- È adatto per motori trifase in corrente alternata;
- È compatibile con le tensioni che si prevede di utilizzare per alimentare il mezzo (24 V);
- Fornisce un quantitativo di corrente (A) adeguato.

Il primo criterio è una conseguenza diretta della scelta del motore: il motore che è stato scelto è senza spazzole, (c.d. Brushless) asincrono trifase. Sarà, quindi, necessario alimentarlo con un regolatore che ammetta tali caratteristiche.

Per il secondo criterio è, invece, necessario valutare quale sarà la tensione da applicare al motore. La maggior parte dei regolatori può accettare voltaggi diversi perché le batterie, in base al numero di celle e alla percentuale di carica, possono fornire tensioni variabili (tale argomento sarà affrontato più nel dettaglio nel paragrafo 2.4.). Il regolatore, nel nostro caso, sarà collegato ad un alimentatore che simulerà una batteria a sei celle, che fornisce una tensione di 24 Volt.

Il terzo punto è quello, forse, in cui la scelta diventa più difficile. Le aziende che producono regolatori hanno in catalogo diverse “famiglie” di E.S.C. . Ciascuna “famiglia” è caratterizzata da specifiche diverse, specializzate per applicazioni differenti. All’interno di ciascuna “famiglia” troviamo lo stesso E.S.C. declinato, però, in dimensioni differenti. La dimensione non è altro che la quantità di corrente che il regolatore riesce a gestire (si ricorda che la quantità di corrente gestita è proporzionale al numero di M.O.S.F.E.T.). Tale dimensione dà la possibilità al progettista di scegliere l’E.S.C. più adatto alle dimensioni del mezzo che sta progettando. I parametri che vanno a influenzare la quantità di corrente (Ampere A) che il regolatore dovrà a fornire al motore è influenzata da diversi aspetti: la dimensione dell’elica, la variazione di velocità angolare richiesta in una determinata manovra, la condizione di volo, la temperatura esterna, il carico (inteso come payload) applicato al mezzo. Tutti questi aspetti devono essere presi in considerazione per la scelta del regolatore.

Il T-Motor T40A ha le seguenti caratteristiche tecniche:

- Corrente in uscita di 40 A fino ad un picco massimo di 60 A per 10 secondi;
- Tensione in entrata da 2 a 6 celle per batterie al litio e da 5 a 18 celle per batterie Nichel/Cadmio o Nichel/Metal idrato;
- B.E.C. da 3A a 5V;
- Velocità di rotazione del motore fino a 35'000 giri al minuto (per motori come quello utilizzato in questo studio considerato senza carico);

Presenta, inoltre, i seguenti settaggi:

- Taglio di potenza per: voltaggio troppo basso, surriscaldamento, perdita del collegamento radio con il pilota;
- Velocità di risposta del motore: normale, soft, super soft (a seconda che debba essere montato su un elicottero, aereo o multirottore)
- 15 toni diversi all’avvio (non hanno una funzione tecnica oltre a quella di segnalare, in modo gradevole, che il regolatore funziona correttamente)

2.3. Elica utilizzata

A differenza di quanto detto nel capitolo relativo alle eliche aeronautiche, le eliche per droni o aeromodelli sono caratterizzate da due valori: il diametro e il passo. Gli altri parametri, come il profilo o l'angolo di calettamento, sono difficilmente valutabili e studiabili, perché si è ancora molto legati alle origini modellistiche. In campo aeronautico, la scelta dell'elica è scrupolosamente studiata, sia dal punto di vista aerodinamico che da quello economico, visto il costo del mezzo e dell'elica. Nell'ambito dei droni e, ancor prima, in quello modellistico, visto che i costi sono considerevolmente meno elevati (i costi variano da pochi euro fino a un centinaio di euro, per pale in carbonio) si preferisce un approccio più empirico, e, pertanto, si provano sul campo eliche di diverse marche, finché non si individua quella che risulti adatta allo scopo.

L'elica utilizzata nello studio è prodotta dall'azienda RCTIMER, è in carbonio, ha un diametro e di 16 pollici (40.64 centimetri) e ha un passo di 5.5”.



Figura 22 - Eliche RC-Timer 16x5.5

È importante rilevare che l'elica in questione presenta una superficie delle pale nettamente più ampia rispetto ad un'elica di pari diametro, ma utilizzata per modelli ad ala fissa. Questa elica, infatti, è specifica per multirotori ed è progettata per garantire spinta a un regime più basso rispetto alle eliche per aerei. In generale, si preferisce far lavorare le eliche dei multirotori a velocità angolari più basse per migliorare i tempi volo. Nell'ambito modellistico, invece, il tempo di volo non è una priorità altrettanto fondamentale, in quanto si privilegiano altri aspetti, quali una maggiore velocità di rotazione del motore che comporta una maggiore reattività del modello.

2.4. Batterie e alimentazione

I parametri che vanno a caratterizzare una batteria sono:

- Capacità di carica [Ah]: indica la quantità di corrente che può essere erogata dalla batteria in un ciclo di scarica completo di un'ora. In altre parole, è la capacità, le dimensioni del “serbatoio” della batteria.
- Voltaggio, numero di celle [V], differenza di potenziale a circuito aperto (d.d.p.): ciascuna batteria è costituita da un certo numero di celle collegate in serie. Ciascuna cella, in base alla sua composizione chimica, è in grado di fornire una ben definita tensione. Collegando in serie più celle, la loro tensione diventerà il prodotto della tensione unitaria della cella per il numero di celle collegate.
- Densità di energia [Wh/kg]: ci permette di valutare, a parità di peso, quale sia la batteria con la maggiore capacità di carica. Questo parametro è strettamente legato alla composizione chimica delle batterie.
- Variazione della tensione nel tempo: la tensione di una batteria dipende sia dalla composizione chimica della cella, sia dalla carica. La tensione è, quindi, variabile nel corso della scarica. Alcune batterie tendono a mantenere un valore di tensione più o meno costante fino alla quasi completa scarica per poi crollare, altre hanno un andamento più lineare.
- Resistenza ai cicli di carica/scarica: le batterie non hanno una durata illimitata, bensì possono essere caricate e scaricate un certo numero di volte. Superato tale limite, le batterie smettono di caricarsi o si ricaricano con una capacità via via decrescente fino a che divengono completamente inutilizzabili.
- Resistenza all'effetto memoria: l'effetto memoria è un fenomeno secondo il quale la modalità in cui è stata scaricata la batteria, ne determina la carica successiva. Se una batteria viene scaricata solo a metà e poi viene rimessa sotto carica può reagire non caricandosi completamente. Queste batterie, per poter essere ricaricate correttamente, devono prima essere scaricate completamente.

Attualmente, sul mercato, esistono diversi tipi di batterie. Esse vengono definite dagli elementi chimici che compongono le celle. Limitandoci alle batterie ricaricabili di uso più comune, troviamo:

- *Batterie al piombo (Pb)*. Ciascuna cella delle batterie fornisce una d.d.p. di 2.1 V. queste batterie hanno un costo relativamente basso, hanno un basso effetto memoria, densità di energia pari a 30Wh/Kg, numero di cicli carica/scarica di circa 500, sono pesanti;
- *Batterie al Nichel-Cadmio (Ni-Cd)*. Ciascuna cella delle batterie fornisce una d.d.p. di 1.2 V. queste batterie hanno un costo relativamente elevato, soffrono di

un rilevante effetto memoria, densità di energia pari a 60Wh/Kg, numero di cicli carica/scarica di circa 2000, peso contenuto;

- *Batterie al Nichel-Metallo idruro (Ni-Mh)*. Ciascuna cella delle batterie fornisce una d.d.p. di 1.2 V. Queste batterie hanno un costo relativamente elevato, discreto effetto memoria (inferiore a Ni/Cd), densità di energia pari a 70Wh/Kg, numero di cicli carica/scarica di circa 1500, peso contenuto;
- *Batterie al Litio (Lipo, Li-Ion)*. Queste batterie sono state determinanti per l'avvento della propulsione elettrica. Grazie alla loro alta densità di energia, tra i 150 e 200 Wh/Kg, garantiscono grandi capacità di corrente con pesi estremamente ridotti. Sono costruite unendo celle semirigide con dimensioni e formati estremamente vari: questa possibilità permette di realizzare pacchi batteria su misura riuscendo a posizionarli in spazi che diversamente sarebbero stati sprecati. Non sono, inoltre, soggette ad effetto memoria, il che le rende estremamente versatili.

Queste batterie hanno, tuttavia, degli aspetti negativi: non mantengono la carica per lunghi periodi di tempo, quindi è necessario ricaricarle e usarle nel giro di pochi giorni per non deteriorarle; non tollerano amperaggi di ricarica troppo elevati o cicli di scarica eccessivi, talvolta tali eventi possono generare perdite di fumi e, in casi peggiori, esplosioni.

2.4.1. Alimentazione sfruttata

Tutti i test che saranno eseguiti saranno svolti al banco, perciò non si renderà necessario utilizzare una batteria. Verrà, invece, utilizzato un alimentatore da banco a tensione e amperaggio variabile, che permetterà di alimentare l'E.S.C. senza curarsi della carica della batteria.



Figura 23 - Keithley 2260B-30-72

L'alimentatore in questione è Keithley 2260B-30-72 6 uscite.

L'alimentatore, collegato alla rete elettrica a 220 V in corrente alternata, sarà impostato su un output al regolatore di tensione di 24 V di tensione, a 15 A. Tale settaggio resterà costante durante tutti i test.

2.5. Banco prova

Per valutare le prestazioni di un impianto di propulsione e anche ottenere i dati che si andranno a riportare nella tesi è stato utilizzato un banco di prova.

Un banco di prova è un supporto sul quale montare un motore e la sua elica. Dopo aver vincolato adeguatamente il sistema a un basamento ben fisso, è possibile, attraverso alcuni dinamometri, ottenere misure utili per la caratterizzazione di una accoppiata motore/elica.

I c.d. dinamometri, che vengono utilizzati nel banco, sono *celle di carico*, parallelepipedi metallici che possono deformarsi se vengono gravate da carichi. Tale deformazione si estrinseca in una variazione della resistenza elettrica interna, misurabile da un trasduttore (Ohmmetro) e convertita in un valore di forza dal calcolatore (es. Newton[N], chilogrammo forza [kgf] o Libbra forza [lbf]) o in un valore di coppia (es. Newton metro [N m], chilogrammo forza metro [kgf m] o libbra forza metro [lbf m]).

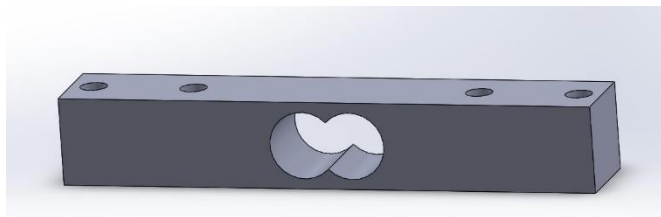


Figura 24 - Cella di carico

Le celle di carico, unitamente a un misuratore di giri, offrono all'utilizzatore del banco sia misure dirette, quali quelle elencate sopra, sia misure derivate, che si ottengono combinando in maniera opportuna le misure dirette (vedi infra).

2.5.1. Banco prova utilizzato

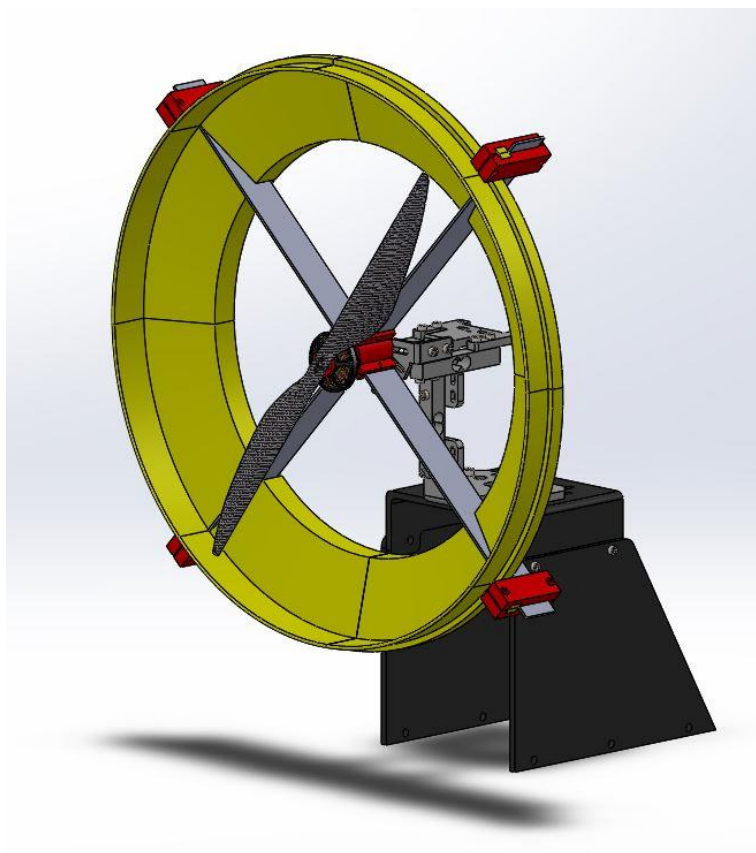


Figura 25 - Banco prova modificato con labbro

Il banco di prova utilizzato per il presente studio è il modello 1580, prodotto da RCbenchmark. Tale strumento è in grado di misurare in maniera diretta le seguenti grandezze:

- Coppia [N m]
- Spinta [kgf]
- Tensione [V]
- Corrente [A]
- Rivoluzioni al minuto [RPM]
- Resistenza interna del motore [Ohm]
- Accelerazioni del castello motore [g]

È inoltre capace di offrire le misure derivate di:

- Efficienza del motore [%]
- Efficienza dell'elica [%]

La misura della spinta è effettuata grazie ad una cella di carico, posizionata al di sotto del banco prova e allineata con l'asse del motore. Con il motore in funzione, l'elica tende a spingere il banco in avanti, andando a deformare la cella e ottenendo così il valore della spinta generata.

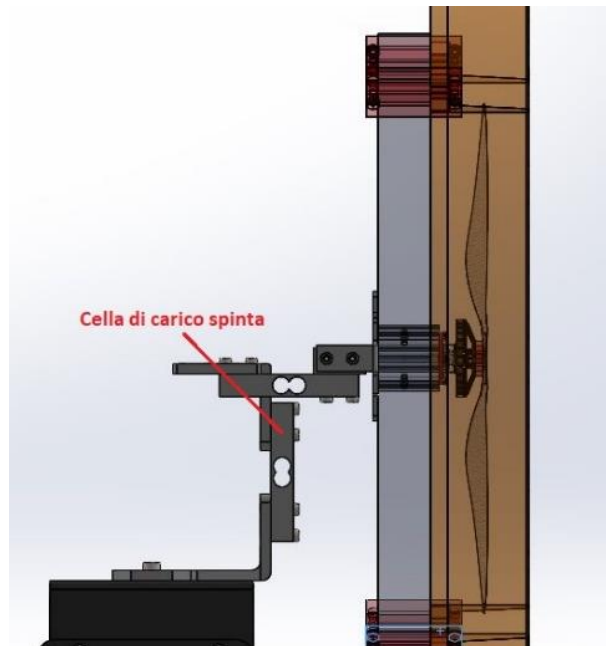


Figura 26 - Cella di carico spinta

La misura della coppia dell'elica è ottenuta, invece, grazie a due celle di carico parallele, equidistanti dal centro dell'elica. Ciascuna delle due celle, quando l'elica comincia a generare un momento, effettua una misura di forza. Combinando le misure delle due celle opposte, e conoscendo la loro rispettiva distanza dall'asse di trazione, si ottiene il valore della coppia generata.

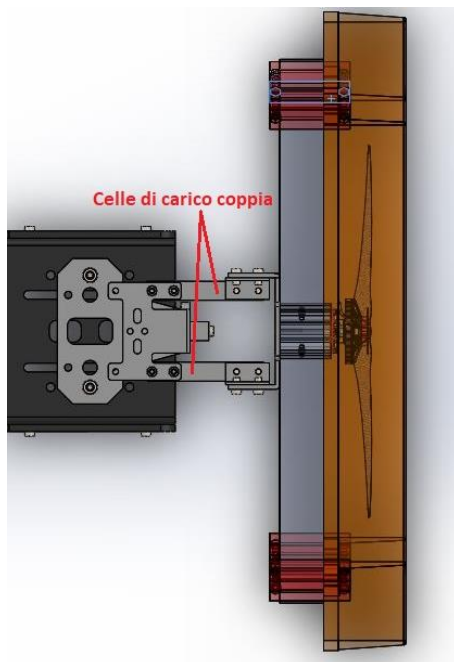


Figura 27 - Celle di carico coppia

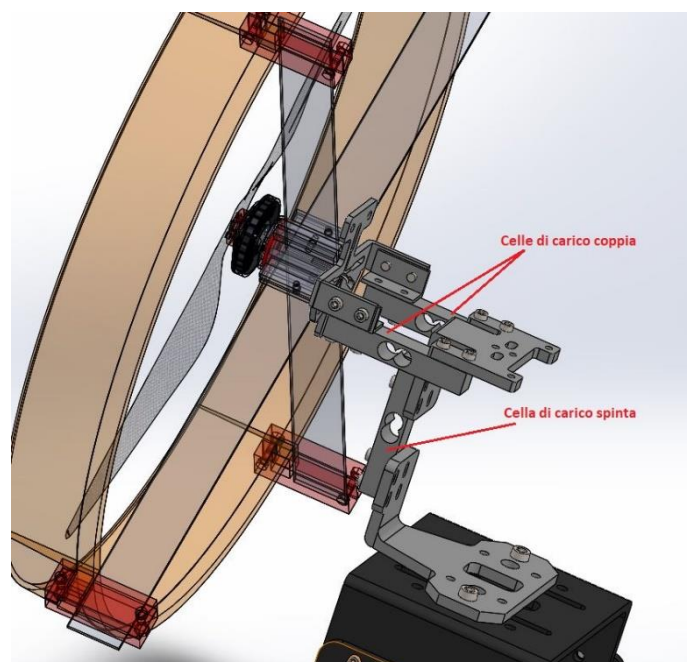


Figura 28 - Disposizione delle celle di carico

Il numero di giri che il motore compie può essere misurato in due modi:

- Sensore ottico: è presente un sensore a infrarossi posizionato a fianco del motore. Sul rotore viene attaccato un piccolo pezzo di materiale adesivo riflettente. Ad ogni rotazione completa del motore, il sensore rileva il passaggio del pezzetto e conta il tempo che intercorre tra un passaggio e l'altro, ottenendo così il valore della velocità angolare;
- Sensore elettronico: la piastra P.C.B. del banco può interfacciarsi con il regolatore di giri, in modo che quest'ultimo possa essere comandato dal computer. Come è stato chiarito sia nel capitolo dei motori, sia nel capitolo dei regolatori, l'E.S.C. stabilisce a quanti giri far funzionare il motore, gestendo la rotazione del campo magnetico. Questa informazione può essere letta dal computer del banco di prova ma si è osservato che non si tratta sempre di una misura affidabile.

Tutti i valori che saranno riportati nelle tabelle dati di R.P.M. saranno acquisiti tramite il sensore ottico.

Il banco che andremo a utilizzare è in grado di effettuare misurazione entro i valori minimi e massimi riportati nella tabella che segue:

Specification	Min.	Max.	Tolerance	Unit
Thrust	-5	5	0.5%	kgf
Torque	-1.5	1.5	0.5%	Nm
Voltage	0	35	0.5%	V
Current	0	40	1%	A
Angular speed*	0	190k	1	eRPM
Coil resistance	0.003	240	0.5%	Ohm
Digital scale	0	3	0.5%	kgf

*Electrical RPM, divide by the number of motor poles to obtain true mechanical RPM.

Figura 29 - Valori di operatività banco prova

È interessante notare che la casa produttrice del banco, per aumentarne la versatilità, ha progettato e realizzato un supporto su cui avvitare i motori dotato di fori e scassi

idonei ad ospitare motori di diversi tipi e dimensione. Questa soluzione permette di testare sistemi propulsivi per droni di media taglia fino a 5 kgf di spinta.

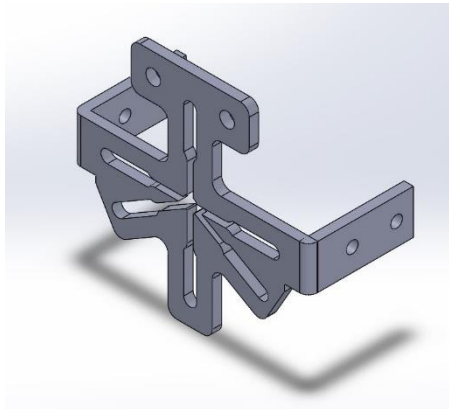


Figura 30 - Staffa supporto motore

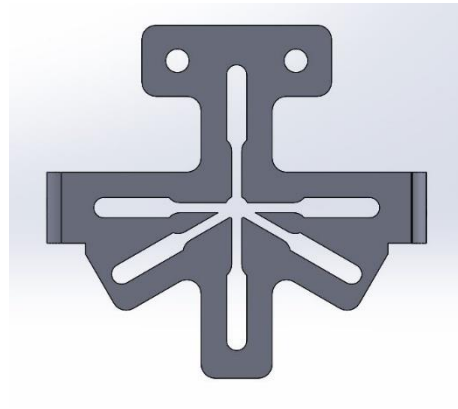


Figura 31 - Staffa supporto motore

2.5.2. Sicurezza

Il banco di prova è dotato, infine, di svariati sistemi di sicurezza, che vanno a togliere completamente la potenza al motore e al regolatore nel momento in cui si superano livelli di guardia impostabili dall'operatore. Questi sistemi sono definiti *Cut Off* e utilizzano gli strumenti di misura di cui il banco è già dotato per valutare quando si sta uscendo da un range di valori di sicurezza.

I *Cut Off* che il banco monitora sono:

- Voltaggio [0 → 35 V];
- Corrente continua [-40 → 40 A];
- Picco di corrente [-50 → 50 A];
- Potenza [0 → 1400 W];
- Spinta [-49 → 49 N];
- Coppia [-2 → 2 N m];
- Velocità angolare [0 → 104'720 rad/s];
- Vibrazioni [0 → 8 g];
- Temperatura [-10 → 120 °C].

L'operatore può, quindi, impostare delle limitazioni ai parametri dell'esperimento entro i valori soprariportati. Se uno qualunque dei parametri va a superare i limiti dei *Cut Off*, il motore viene arrestato.

È, inoltre, possibile utilizzare il tasto SPACE della tastiera come “pulsante antipánico”. Premendolo, infatti, si arresta qualunque operazione il motore stia compiendo, al pari dei Cut Off

La natura sperimentale dello studio richiede l’implementazione di apparecchiature di nuova realizzazione e, pertanto, finora mai testate. Ciononostante, l’attenzione alla sicurezza è sempre stata messa in primo piano e, anche utilizzando componenti che si presentano solidi e robusti, ci si è ispirati a criteri di massima prudenzialità e si è ritenuto preferibile che ogni operazione venisse seguita costantemente da due operatori; tale metodo permette ad entrambi gli operatori di controllare in maniera ridondante tutte le procedure in modo da essere sempre pronti ad interrompere l’intero procedimento qualora si verificassero situazioni potenzialmente pericolose.

3. Capitolo 3

In questo capitolo si presenterà il modo in cui si è proceduto per la realizzazione dell'esperimento, dalla progettazione del supporto per gli imbrocchi e degli imbrocchi stessi fino alle analisi eseguite con i pezzi prodotti. La progettazione di tutte le componenti integrative al banco di prova è stata fatta con un software di disegno 3D mentre, per l'acquisizione dati, si è utilizzato il software rilasciato insieme al banco di prova stesso.

3.1. Programma di acquisizione dati

L'acquisizione dei dati è stata possibile grazie al programma di acquisizione acquistato insieme al banco prova.

Detto programma permette di acquisire i dati sia in modalità automatica che manuale.

La modalità automatica permette al banco di eseguire degli script, già presenti in memoria, avviando in maniera completamente automatizzata un ciclo di misurazioni. Questa modalità automatica consente di utilizzare diversi tipi di cicli e, inoltre, permette all'operatore di modificarli, qualora si rendesse necessario personalizzarli.

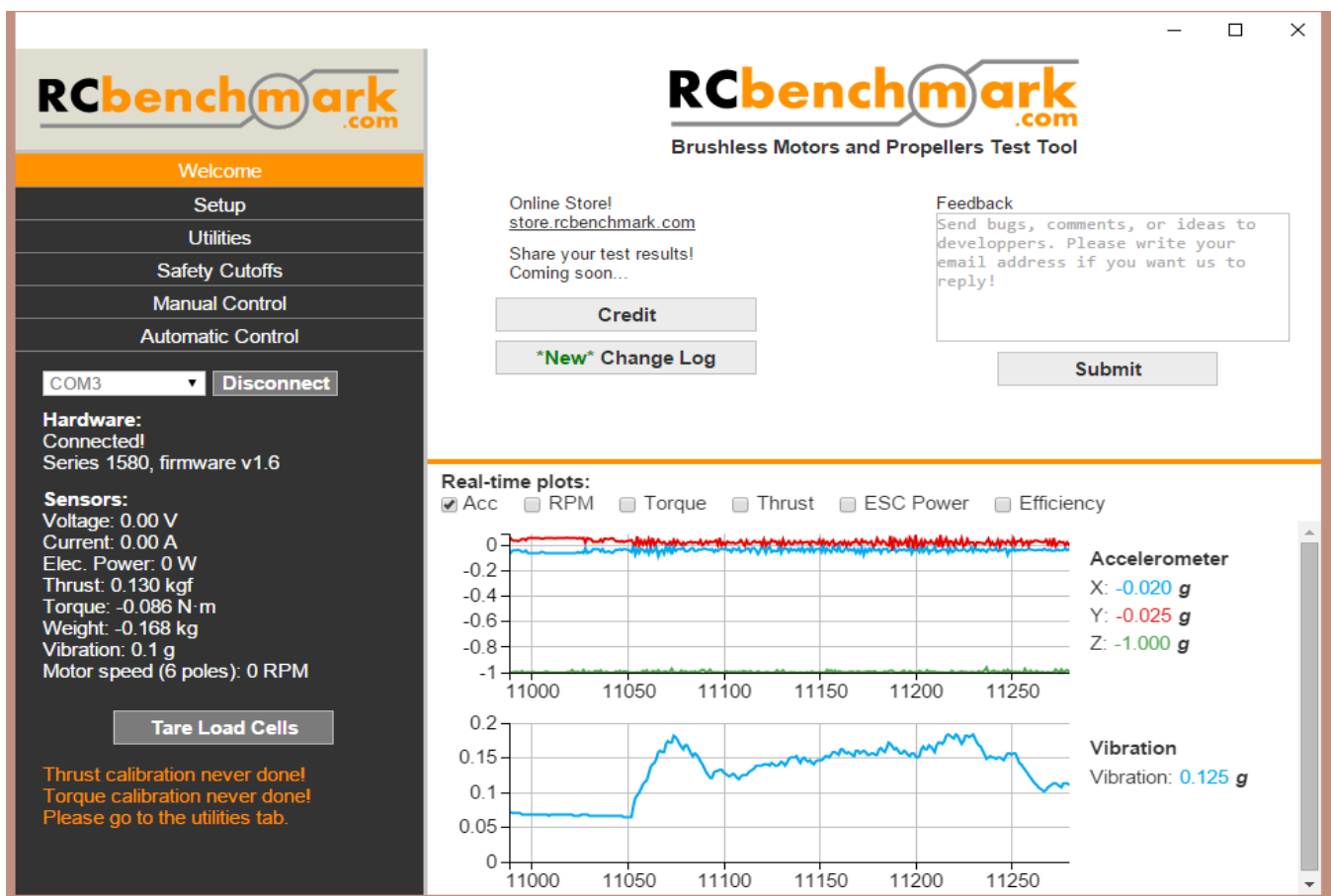


Figura 32 - Schermata programma acquisizione dati

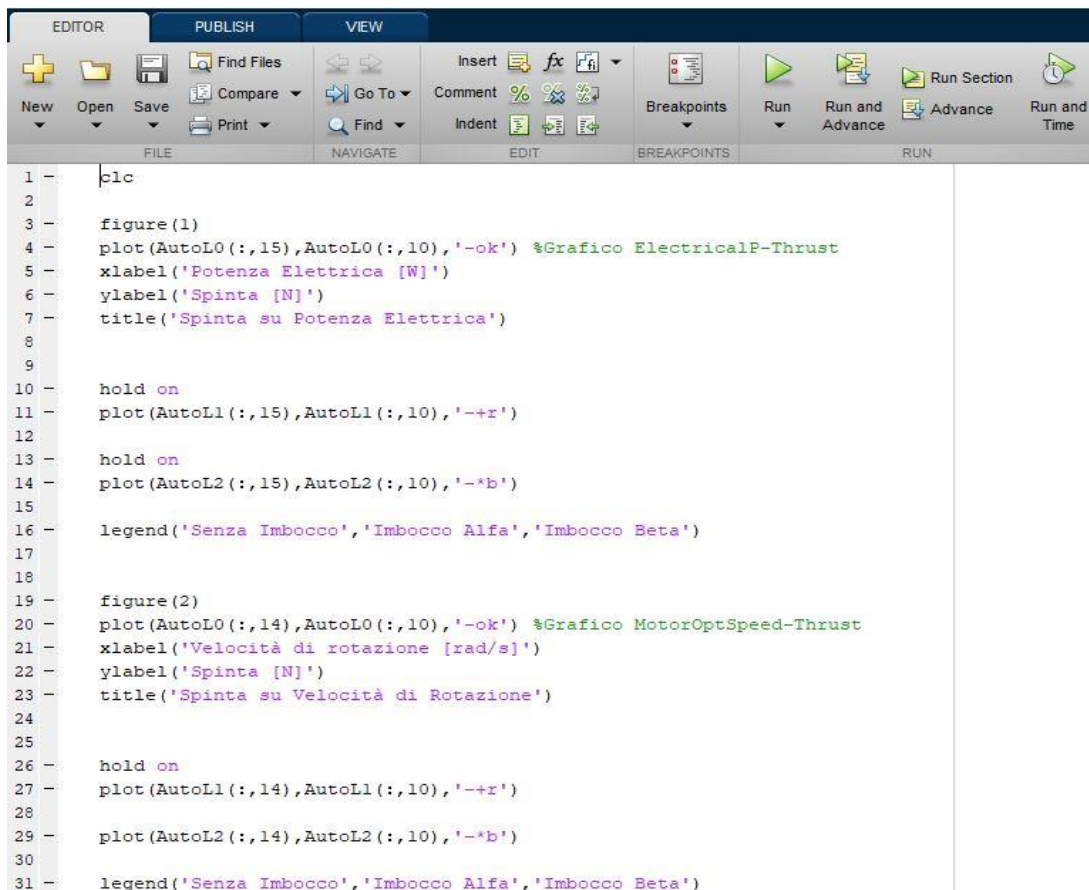
Alternativamente, può essere eseguito un ciclo di misure manuali. In questo modo, l'operatore, in maniera completamente autonoma, gestisce il regime del motore e l'acquisizione dei campioni.

Per questo studio è stata inizialmente utilizzata la modalità manuale: essa consente di seguire più direttamente lo svolgimento dell'esperimento e di avere un controllo attento e consapevole sulle operazioni in corso e su eventuali criticità che si possono presentare.

Tuttavia, dopo alcuni tentativi in modalità manuale, si è preferita la modalità automatica: in questo modo, infatti, il computer si occupa della gestione del regime del motore e delle misure, liberando gli operatori da tale onerosa attività e lasciandoli liberi di concentrarsi su eventuali segnali di allarme, quali vibrazioni o rumori anomali.

3.1.1. Modalità d'acquisizione dati

Il programma di analisi dati del banco prova, in seguito ai test eseguiti, produce tabelle di dati con estensione .csv. Tale estensione permette ai software di analisi matematiche, quali Excel o Matlab, di processare le tabelle stesse, di ottenere misure derivate diverse da quelle che già fornite in tabella e di tracciare grafici al fine di confrontare e valutare le prestazioni. Si riportano gli script Matlab prodotti per ottenere i grafici che verranno presentati in seguito:



```
1 - clc
2
3 - figure(1)
4 - plot(AutoL0(:,15),AutoL0(:,10),'-ok') %Grafico ElectricalP-Thrust
5 - xlabel('Potenza Elettrica [W]')
6 - ylabel('Spinta [N]')
7 - title('Spinta su Potenza Elettrica')
8
9
10 - hold on
11 - plot(AutoL1(:,15),AutoL1(:,10),'-+r')
12
13 - hold on
14 - plot(AutoL2(:,15),AutoL2(:,10),'-*b')
15
16 - legend('Senza Imbocco','Imbocco Alfa','Imbocco Beta')
17
18
19 - figure(2)
20 - plot(AutoL0(:,14),AutoL0(:,10),'-ok') %Grafico MotorOptSpeed-Thrust
21 - xlabel('Velocità di rotazione [rad/s]')
22 - ylabel('Spinta [N]')
23 - title('Spinta su Velocità di Rotazione')
24
25
26 - hold on
27 - plot(AutoL1(:,14),AutoL1(:,10),'-+r')
28
29 - plot(AutoL2(:,14),AutoL2(:,10),'-*b')
30
31 - legend('Senza Imbocco','Imbocco Alfa','Imbocco Beta')
```

Figura 33 – Script per plot delle misure dirette

```

1 -   clc
2 -
3 -   D = 16;
4 -   R = (D/2)*2.54*0.01;
5 -   A = pi*R^2;
6 -
7 -
8 -   % Labbro 0
9 -
10 -  Wh0 = sqrt(AutoL0(:,10) ./ (2*1.225*A))
11 -
12 -  Pi0 = Wh0.*AutoL0(:,10)
13 -
14 -  FME0 = Pi0./AutoL0(:,15)
15 -
16 -  FMM0 = Pi0./AutoL0(:,16)
17 -
18 -  figure(1) %Figura di merito elettrica su n. giri Labbro 0
19 -  plot(AutoL0(:,14),FME0,'-ok')
20 -  xlabel('Velocità di rotazione [rad/s]')
21 -  ylabel('Figura di merito elettrica')
22 -  title('Figura di merito elettrica su n. giri')
23 -  % grid on
24 -  legend('Senza Imbocco')
25 -
26 -  figure(2) %Figura di merito meccanica su n. giri
27 -  plot(AutoL0(:,14),FMM0,'-ok')
28 -  xlabel('Velocità di rotazione [rad/s]')
29 -  ylabel('Figura di merito meccanica')
30 -  title('Figura di merito meccanica su n. giri')
31 -  % grid on
32 -  legend('Senza Imbocco')

```

Figura 34 – Script per plot delle misure indirette

3.1.2. Procedura di avvio test

Per poter avviare i test in maniera corretta e sicura, è stata sempre seguita la seguente procedura:

- 1) Verificare prima di ogni test che ciascuna vite presente nel banco fosse ben stretta, che ogni filo fosse saldamente legato al banco e che l'elica girasse senza alcun tipo di interferenza;
- 2) Collegare il banco prova via USB al computer e verificare il suo corretto funzionamento;
- 3) Settare i valori di Cut Off;
- 4) Calibrare il banco prova seguendo la procedura prevista;
- 5) Accendere l'alimentatore;
- 6) Impostare il valore di tensione a 24 V e di corrente a 15 A;
- 7) Collegare l'alimentatore al regolatore di giri con il connettore XT-60;
- 8) Attendere la conferma (sonora) dal regolatore di corretto avviamento;
- 9) Inizio test.

Una volta che il sistema è operativo, si può partire con l'avvio delle operazioni di misura.

Perché si possa fare un confronto tra le varie configurazioni di imbrocchi è necessario che tutti i parametri di comando vengano ripetuti in maniera uguale.

Si è così definita la seguente linea guida:

- Il valore P.W.M. inoltrato al regolatore varia da un minimo di 1000 μ s a un massimo di 1700 μ s con intervalli di 100. Si ottengono così otto livelli di potenza.
- Per ciascun valore di potenza sono stati acquisiti 100 campioni. In seguito, i valori presi a parità di segnale P.W.M. sono mediati in maniera da ottenere un unico valore.

3.2. Progettazione della struttura

Per poter procedere alla progettazione della struttura che deve ospitare gli imbrocchi è stato prima necessario studiare a fondo il banco prova presente in laboratorio e tradurlo sul programma di disegno. Ciascun elemento del banco, fatto salvo per la piastra P.C.B. di connettori e centraline, è stato smontato, misurato, e quindi riportato in 3D. Il risultato è una copia esatta del banco presente in laboratorio ma su un programma di disegno 3D; da qui si è proceduto alla progettazione di tutti gli elementi necessari per la realizzazione dei test. Questa procedura ha permesso di studiare, progettare e realizzare elementi che combaciassero correttamente con gli elementi del banco che già erano esistenti.

3.2.1. Programma C.A.D.

Per la progettazione delle componenti che sono state necessarie per lo studio si è utilizzato un software di disegno 3D al calcolatore. Il software è *Dassault Solidworks*.



Figura 35 – Software C.A.D. Solidworks

Questo programma permette di realizzare progetti in 2D e 3D di solidi e superfici, con un sistema geometrico di tipo parametrico personalizzabile in ogni aspetto. Esso, insieme alla possibilità di disegnare, offre numerosi strumenti utili per analisi meccaniche, fluidodinamiche ed elettriche oltre alla possibilità di simulare, grazie alla vasta libreria, l'utilizzo di materiali e lavorazioni meccaniche specifiche.

È inoltre possibile, una volta realizzati più componenti, assemblarli tra loro, attraverso il comando di *accoppiamento* per ottenere sistemi meccanici complessi a cui aggiungere, se necessario, movimenti e cinematismi. Tale strumento permette di valutare anche eventuali interferenze tra componenti nel moto progettato, permettendo di correggere eventuali imperfezioni.

3.2.2. Progettazione supporto imbrocchi

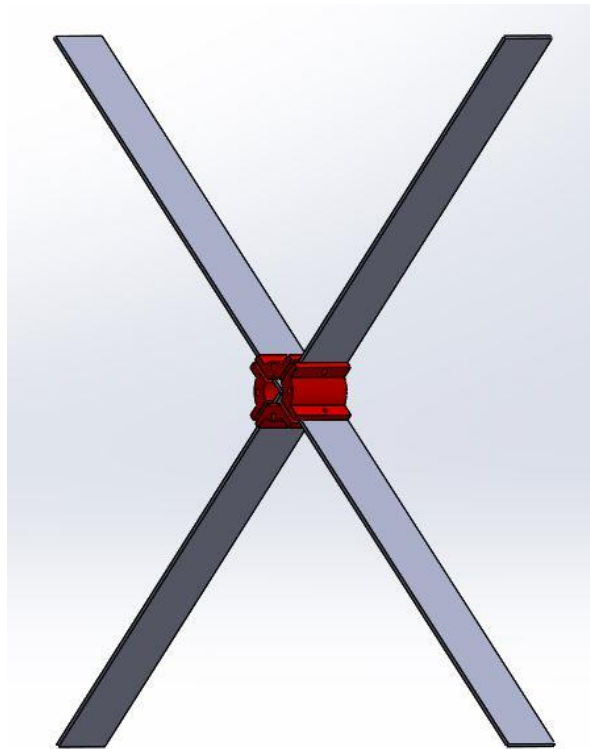


Figura 36 - Supporto imbrocchi

Nella prima fase di lavoro, si è proceduto alla riproduzione di tutti i pezzi che vanno a comporre il banco, facendo particolare attenzione alle posizioni ed alle dimensioni delle viti di fissaggio dei componenti. In seguito, si è passati alla progettazione di un telaio che potesse essere fissato al banco prova e che potesse sorreggere gli imbrocchi che si era preventivato di realizzare e testare. Si è cercato, inoltre, di ottenere un sistema che fosse in grado di ospitare imbrocchi di altre forme e dimensioni, per poter utilizzare il banco e gli imbrocchi con eliche di altri diametri. Il risultato di tale progettazione è

stato un supporto a croce, costituito da due barre di alluminio (500 x 30 [mm]) rette da quattro supporti angolari.

Nel supporto sono presenti due tipi di fori: i primi quattro sono fori passanti attraverso le barre di alluminio e gli angolari, in modo da poter permettere il passaggio di viti che stringono gli elementi e le barre in un supporto rigido; gli altri quattro fori permettono il passaggio delle viti di fissaggio del motore sul supporto motore. È stato necessario riportare le posizioni originali delle viti sul supporto motore per fare in modo che combaciassero.

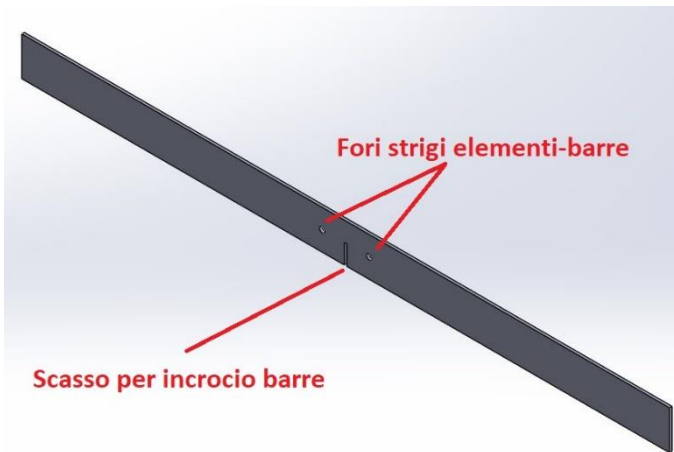


Figura 37 - Asta in alluminio reggi imbocchi

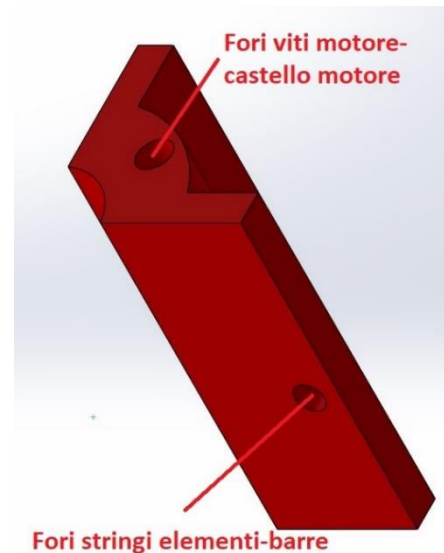


Figura 38 - Elemento angolare del supporto

Questo supporto va a interporsi tra il supporto motore del banco di prova e il motore stesso. Ciò permette sia di avere il supporto degli imbocchi perfettamente allineato con l'asse del motore, sia di prendere in considerazione le prestazioni degli imbocchi nelle misure effettuate dalle celle di carico. Per poter fissare gli imbocchi a questa struttura, sono stati progettati anche blocchi capaci di scorrere lungo le barre.



Figura 39 - Blocco mobile di collegamento tra supporto e labbri

La loro mobilità permette di progettare imbocchi di svariati diametri, mantenendo inalterata la struttura di supporto. Una volta deciso il diametro dell'imbocco, i blocchi possono essere fatti scorrere lungo le aste di alluminio per intercettare gli inserti di fissaggio dell'imbocco inserendoli nelle apposite scanalature e fissandoli tramite viti.

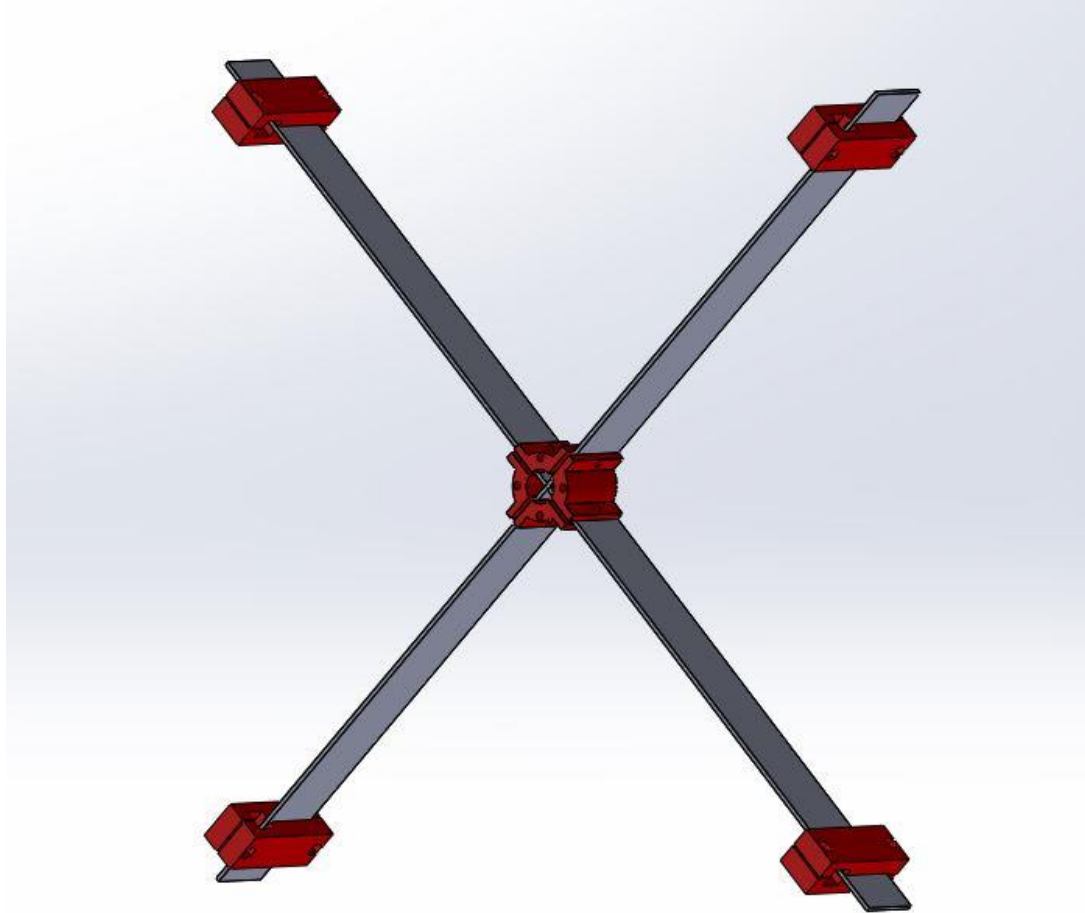


Figura 40 - Supporto reggi labbri assemblato

3.2.3. Progettazione imbocchi

Per poter fare un confronto scientificamente corretto con i risultati riportati nel paper dell'Università di Oradea, è necessario realizzare i medesimi imbocchi che sono stati da loro disegnati. Gli imbocchi oggetto di studio sono tre: il primo non è altro che una parete parallela al flusso, il secondo è un condotto convergente ed il terzo è un condotto convergente, equivalente al secondo ma con la parte terminale più corta, al fine di realizzare un oggetto più leggero. Le misure di tali imbocchi derivano dalla seguente raffigurazione grafica estratta dal paper:

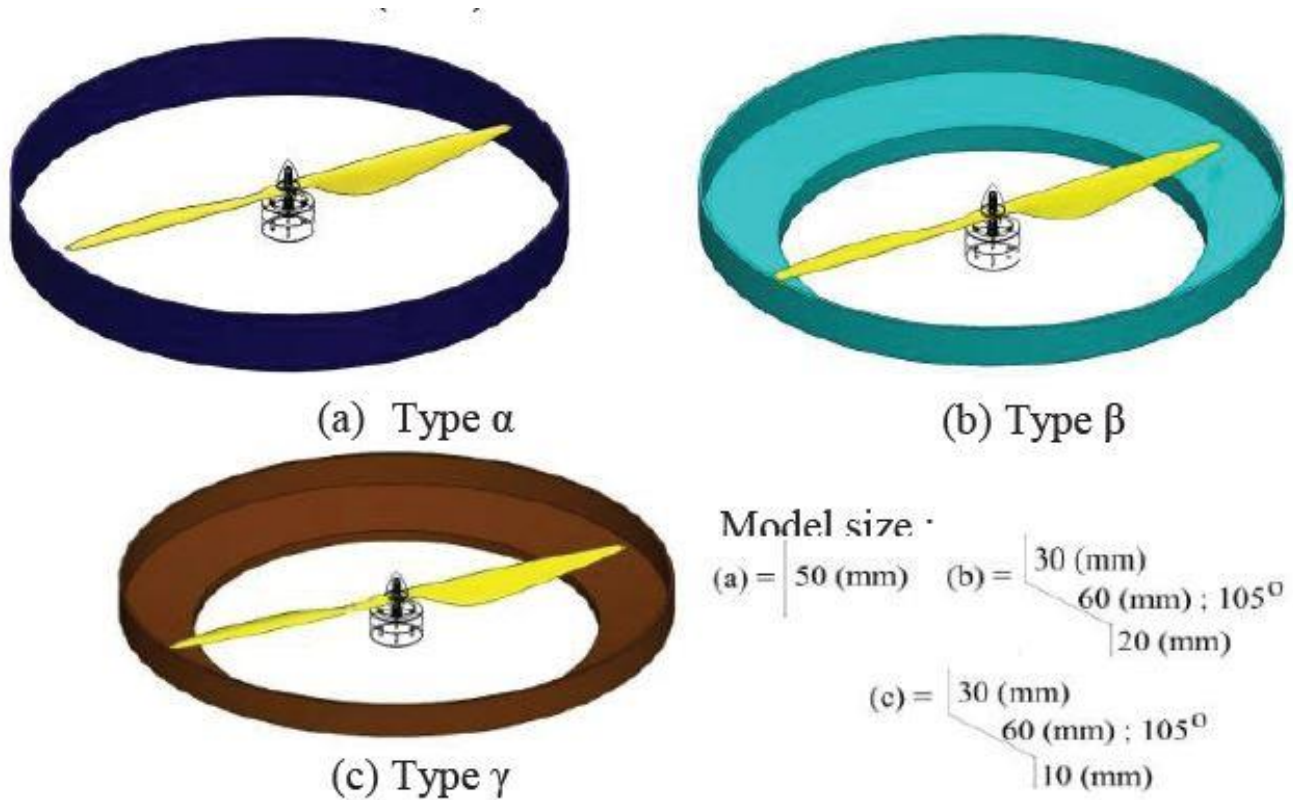


Figura 41 - Imbocchi valutati nello studio della facoltà di Oradea

Da questi disegni si è cominciata la progettazione con il programma di disegno C.A.D. per realizzare imbocchi che fossero montabili sul supporto precedentemente realizzato.

Dopo alcune ore di lavoro il risultati ottenuti sono quelli riportati nelle immagini sottostanti. Le geometrie originali sono state rispettate, ma è stato necessario fornire alle pareti degli imbocchi degli spessori di qualche millimetro per garantire una adeguata solidità strutturale. Le superfici ampie come quelle presenti nell'imbocco Beta e Gamma sono sottoposte a non trascurabili carichi aerodinamici; è quindi importante dimensionarle affinché non flettano, interferendo con la rotazione dell'elica.

I risultati della progettazione al C.A.D. sono:

- Imbocco dritto o *Type a*

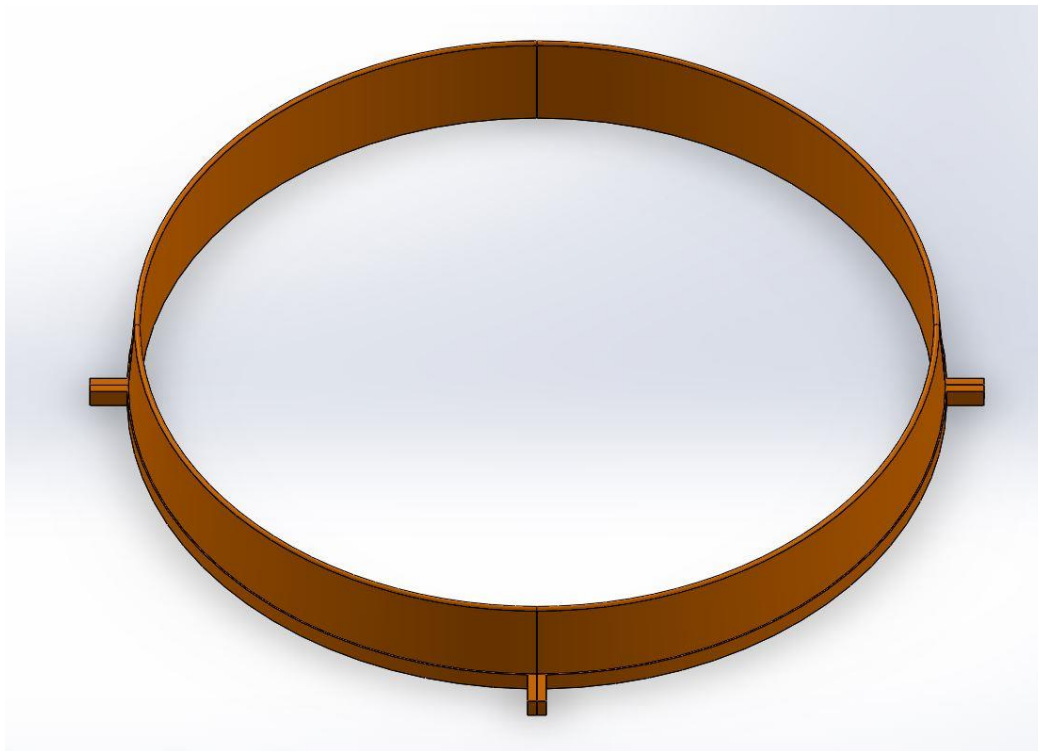


Figura 42 - Imbocco con pareti dritte

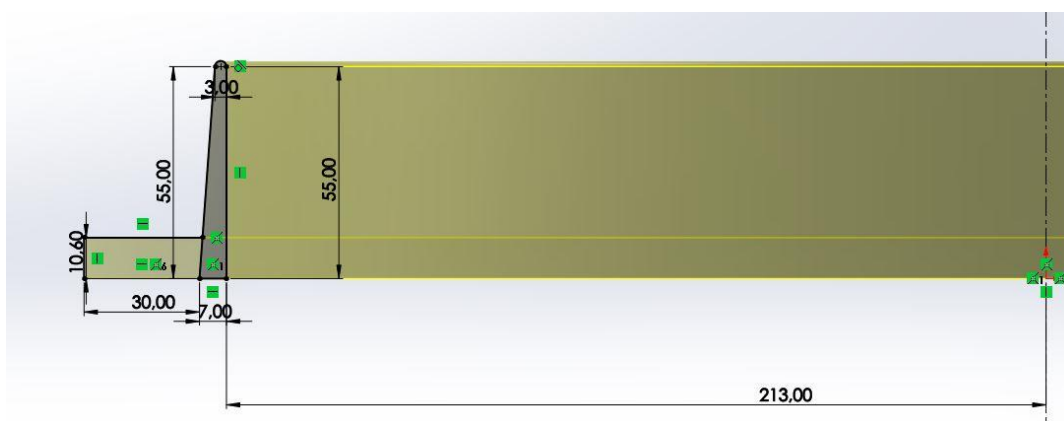


Figura 43 - Imbocco con pareti dritte - misure effettive

- Imbocco convergente pesante o *Type β*

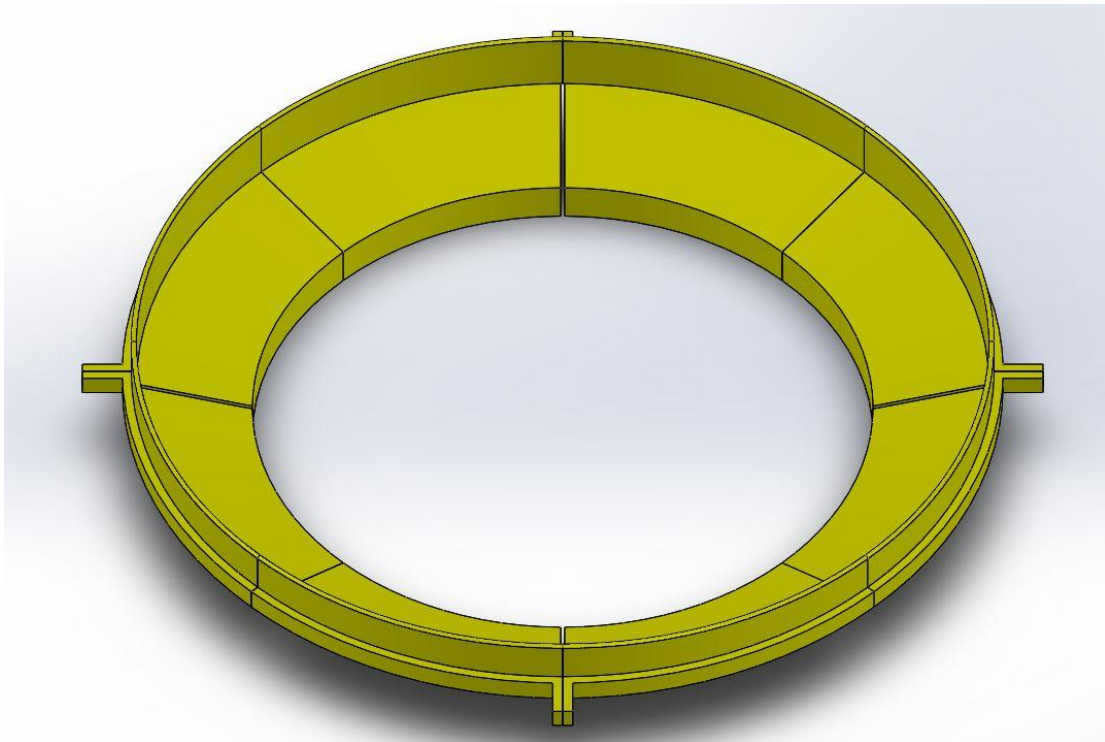


Figura 44 – Imbocco convergente pesante

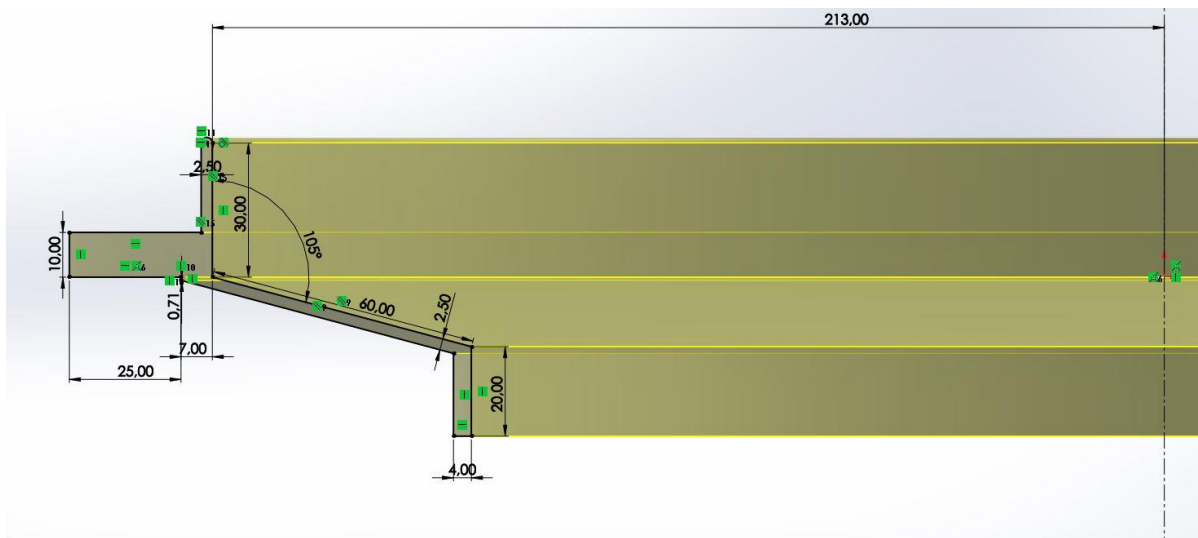


Figura 45 - Imbocco convergente pesante - misure effettive

- Imbocco convergente leggero o *Type γ*

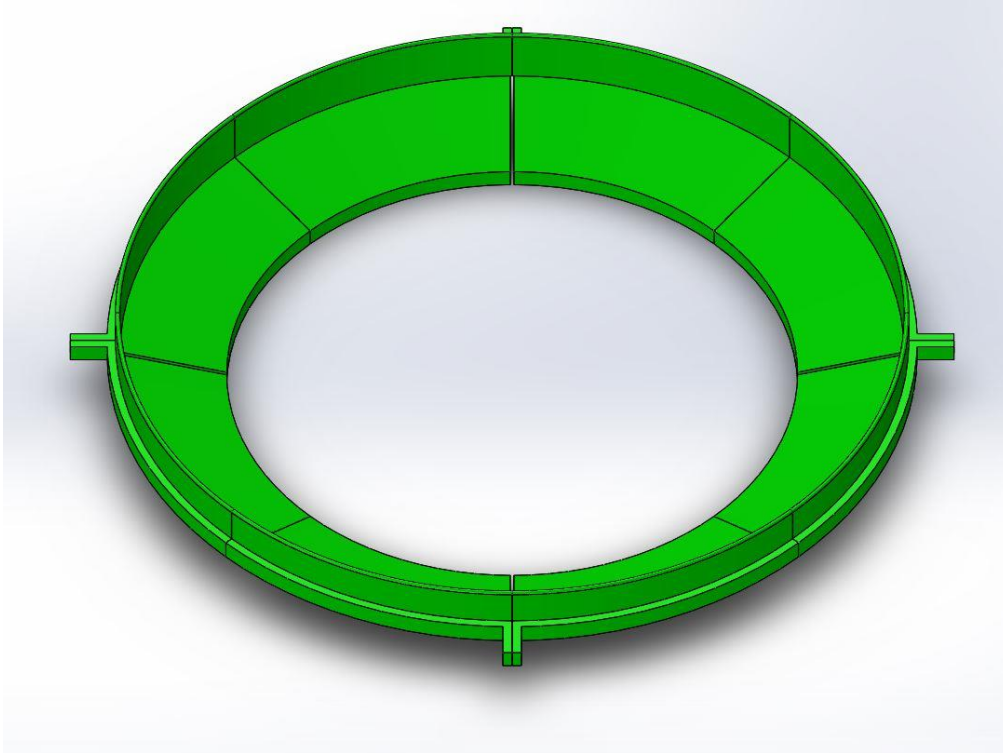


Figura 46 - Imbocco convergente leggero

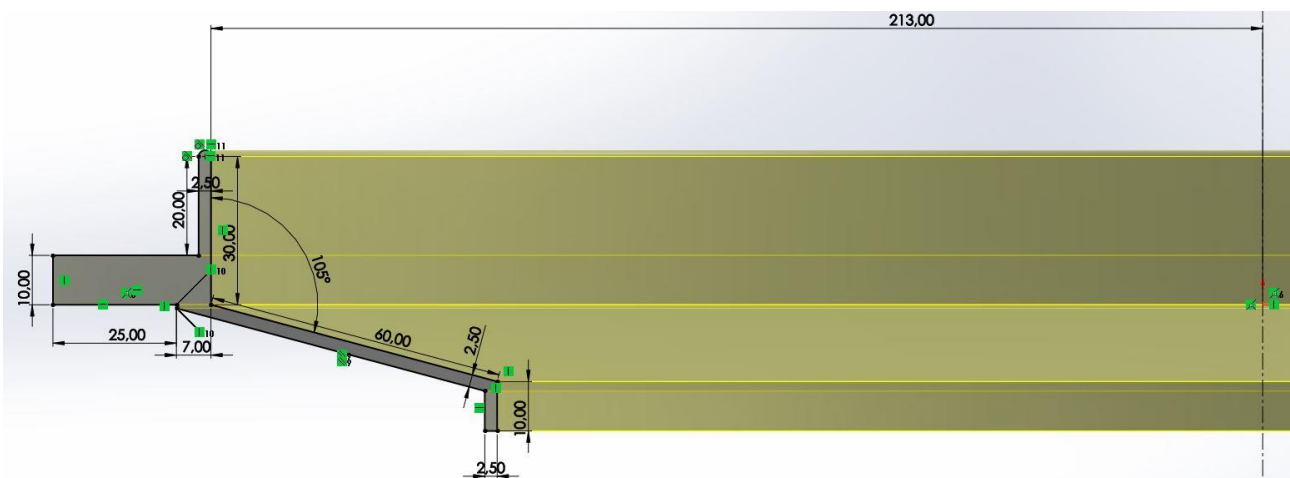


Figura 47 - Imbocco convergente leggero - misure effettive

3.3. Realizzazione degli imbocchi

Per la realizzazione degli imbocchi sono state prese in esame diverse soluzioni. In linea di principio si è cercato di realizzarli nel modo più economico possibile in considerazione del fatto che si trattava di materiale a puro uso sperimentale. Come primo approccio si è cercato di adattare materiali già esistenti, cercando di apportarvi modifiche. Si era pensato, infatti, di provare a usare dei tubi in P.V.C. utilizzati soprattutto in ambito edilizio, ma il sistema di fissaggio sui supporti mobili (fig 40). sarebbe risultato poco affidabile, in quanto basato su dentini di plastica incollati sulla superficie del tubo e, pertanto, non particolarmente robusti.

Si è quindi optato per la stampa in 3D di tutti i componenti.

3.3.1. Realizzazione imbocco α

L'imbocco di tipo α è stato realizzato in quattro pezzi: la sua conformazione, relativamente semplice, ha consentito di appoggiarlo sulla sua base e stamparlo senza la necessità di aggiungere materiale di supporto. Le dimensioni e la forma sono compatibili con il piatto di stampa, per cui non è stato necessario effettuare modifiche ai pezzi.

3.3.2. Realizzazione imbocco β

L'imbocco di tipo β , invece, ha una geometria più complessa, tale da impedire la stampa dei pezzi da un quarto ciascuno senza l'aggiunta di grosse quantità di materiale di supporto.

Si è, quindi, optato per dividerlo in otto pezzi, che sarebbero stati incollati successivamente. Tale scelta si è resa necessaria in quanto non sarebbe stato possibile stampare una porzione pari ad un quarto dell'imbocco in unico pezzo, senza aggiungere una rilevante quantità di materiale di sostegno o senza rischiare che i pezzi si deformassero durante il processo di stampa.

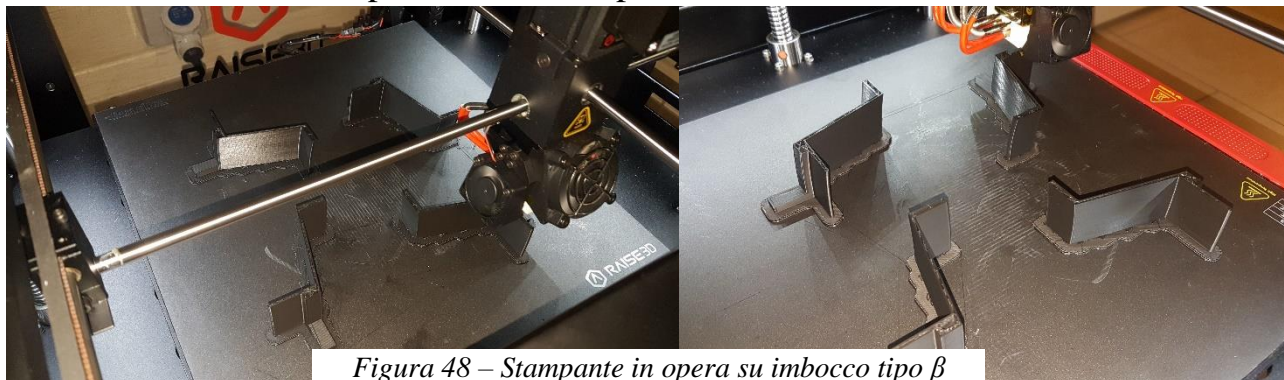


Figura 48 – Stampante in opera su imbocco tipo β

Una volta stampati i pezzi, si è proceduto ad una breve ricerca e ad alcuni test con colle diverse per valutare quale fosse la più resistente per giuntare gli ottavi dell'imbocco.



Figura 49 – Test di incollaggio

La colla più adatta per questo tipo di applicazione è stata la *Loctite Super Attack PLASTICA* che, nei provini, è stata ribattezzata *Ap*.

Sotto un elevato carico a flessione è stato l'unico incollaggio a resistere lungo la giunzione, generando una crepa sulla plastica adiacente.

In seguito all'incollaggio si è proceduto a limare le imperfezioni con un utensile a punta rotante (Dremel) e carta vetrata abrasiva.

3.3.3. Stampa 3D

La stampante 3D che è stata utilizzata è la Raise3d Pro2 gentilmente offerta da ZEPHYR S.R.L.



Figura 50 – Raise 3D

La stampante Raise3D ha le seguenti caratteristiche:

- Tecnologia di stampa: filamento fuso
- Precisione X-Y = 0,0125 mm/Z = 0,00125
- Risoluzione layers: 0,01 – 0,25 mm
- Volume di stampa: 30 x 30 x 60 cm
- Estrusori: 2
- Diametro filamento: 1,75 mm
- Foro ugello: 0,2/0,4/0,6/0,8 mm
- Temperatura del piatto riscaldato massima: 110 °C
- Temperatura dell'estrusore: 170 – 300 °C
- Velocità di stampa: 30-150 mm/s
- Tipi di filamento: praticamente tutti
- Porte: SD, USB, Ethernet

- Touchscreen: full color 7" 1024×768 pixel
- Potenza assorbita: 600 W
- Dimensioni: 62 x 69 x 111 cm

Si è provveduto, in primo luogo, a realizzare gli angolari per il supporto degli imbocchi e i blocchi mobili per gli anelli. Questi elementi, già al primo tentativo di stampa, sono risultati adeguati al loro scopo e sono risultati di buona qualità.

Sfortunatamente, la realizzazione degli imbocchi è stata più travagliata. La stampa, in alcuni casi, ha dato problemi a causa di sollevamenti indesiderati del pezzo dal piatto di stampa o di rottura del filamento nel processo di produzione. Il problema è stato imputato alle alte temperature estive che, unite al calore generato dalla stampante, indebolivano il filamento e non gli consentivano di aderire correttamente al piatto di stampa. Si è così deciso di trasferire la stampante in una cantina della sede e, dopo alcuni tentativi, si è potuto rilevare che un ambiente più fresco giova alla qualità e all'affidabilità delle stampe, permettendo di ottenere i pezzi in condizioni perfette.

3.4. Analisi delle prestazioni

Ciascuna configurazione sarà valutata in base ad alcuni parametri ottenuti dalle misurazioni del banco prova. Si cercherà di estrapolare i risultati che meglio esplicano le prestazioni del sistema propulsivo, in modo da ottenere dati che verranno prima analizzati singolarmente, per ciascun tipo di configurazione, e, in seguito, al capitolo quattro, verrà fatto il confronto tra tutte le configurazioni per valutare quale sia quella migliore.

Le grandezze che saranno valutate sono:

- Spinta [N] su potenza elettrica [W]
- Spinta [N] su velocità di rotazione [rad/s]
- Figura di merito elettrica su numero di giri [rad/s]
- Figura di merito meccanica su numero di giri [rad/s]

Spinta, potenza elettrica e velocità di rotazione sono valori che vengono misurati e registrati direttamente dal software del banco di prova. È, invece, necessario calcolare le figure di merito.

3.4.1. Figura di merito elettrica

La figura di merito elettrica è una misura ricavata algebricamente che valuta il rapporto tra la potenza ideale necessaria al funzionamento dell'elica e la potenza elettrica che effettivamente assorbe il motore elettrico, all'atto pratico, per farla girare

La formula è così definita:

$$FME = \frac{P_i}{P_e}$$

P_i si ricava da:

$$P_i = W_h T$$

in cui W_h risulta essere il valore di velocità in hovering, calcolato secondo la teoria del disco attuatore

$$W_h = \sqrt{\frac{T}{2 \rho A}}$$

T è, invece, il valore di spinta (thrust) misurata dal banco in Newton[N], ρ la densità dell'aria (1.225 kg/m^3) e A il disco spazzato dall'elica in metri quadri [m^2] (se l'elica è da 16" il valore di A è 0.1297 m^2).

P_e è fornita dal programma del banco prova ma per completezza si può definire matematicamente come:

$$P_e = V I$$

dove V è la tensione che viene fornita al regolatore (24 V in corrente continua) e I è la quantità di corrente che il motore assorbe. A differenza della tensione, che è costante, la corrente assorbita varia al variare del numero di giri e, di conseguenza, varia P_e .

3.4.2. Figura di merito meccanica

La figura di merito meccanica è una misura ricavata algebricamente che valuta il rapporto tra la potenza ideale necessaria al funzionamento dell'elica e la potenza meccanica che il motore imprime all'elica all'atto pratico.

La formula è così definita:

$$FMM = \frac{P_i}{P_m}$$

P_i si ricava da:

$$P_i = W_h T$$

in cui W_h risulta essere il valore di velocità in hovering, calcolato secondo la teoria del disco attuatore

$$W_h = \sqrt{\frac{T}{2 \rho A}}$$

T è, invece, il valore di spinta (thrust) misurata dal banco in Newton[N], ρ la densità dell'aria (1.225 kg/m³) e A il disco spazzato dall'elica in metri quadri [m²] (se l'elica è da 16" il valore di A è 0.1297m²).

P_m è fornita dal programma del banco prova ma per completezza si può definire matematicamente come:

$$P_m = C \omega$$

dove C è la coppia misurata dalle celle di carico contrapposte in Newton per metro [Nm] e ω è la velocità di rotazione misurata in rad/s

3.5. Analisi senza imbrocchi

Il primo test svolto è stato senza alcun imbrocco montato sul banco prova. I dati ottenuti faranno da riferimento per i successivi test. Si potrà, infatti, valutare se la presenza degli imbrocchi potrà migliorare, peggiorare o mantenere invariate le prestazioni.

La configurazione del banco prova senza alcun imbrocco è la seguente:



Figura 52 - Banco prova, test senza imbrocchi

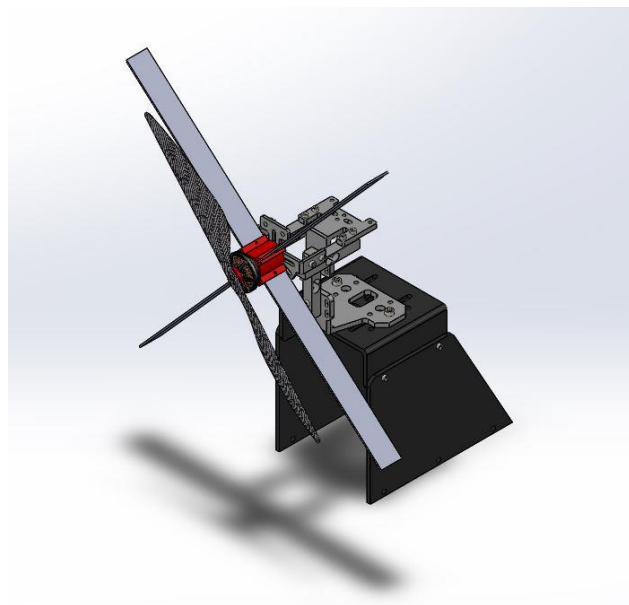


Figura 51 - Banco prova, test senza imbrocchi

Questa configurazione non è altro che la normale configurazione delle eliche non intubate che si potrebbero trovare su un drone. È stato lasciato montato il supporto degli imbrocchi poiché la sua presenza non va a inficiare in maniera sensibile i test.

I risultati ottenuti sono riportati nella tabella sottostante:

ESC signal [μ s]	Torque [Nm]	Thrust [N]	Voltage [V]	Current [A]	Optical speed [rad/s]	Electric power [W]	Mechanical Power [W]	Motor Efficiency [%]
1000	0,000	0.002	23,984	0,010	0,000	0,230	0,000	0,000
1100	0,020	0.788	23,976	0,242	114,354	5,801	2,243	38,676
1200	0,048	2,164	23,957	0,791	185,354	18,947	8,896	46,952
1300	0,090	4,201	23,924	1,834	248,814	43,877	22,354	50,950
1400	0,135	6,723	23,866	3,659	310,599	87,316	41,935	48,026
1500	0,187	9,834	23,771	6,556	368,928	155,831	68,952	44,232
1600	0,229	12,350	23,661	9,944	411,234	235,278	94,122	39,990
1700	0,292	14,646	23,527	14,070	441,184	331,010	128,743	38,896

Figura 53 – Tabella dati senza imbrocco

I relativi grafici:

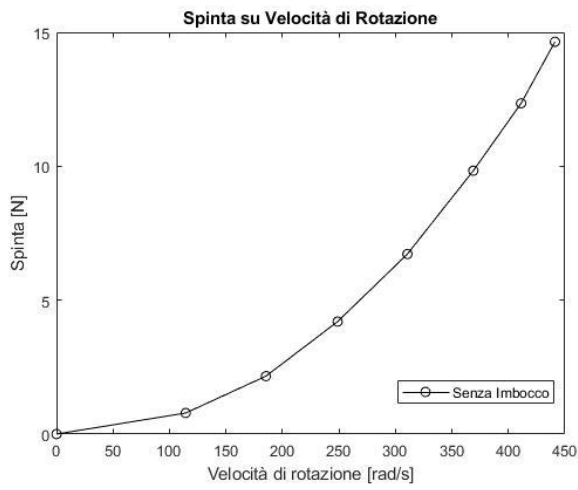


Figura 55 – Spinta su velocità di rotazione, nessun imbocco

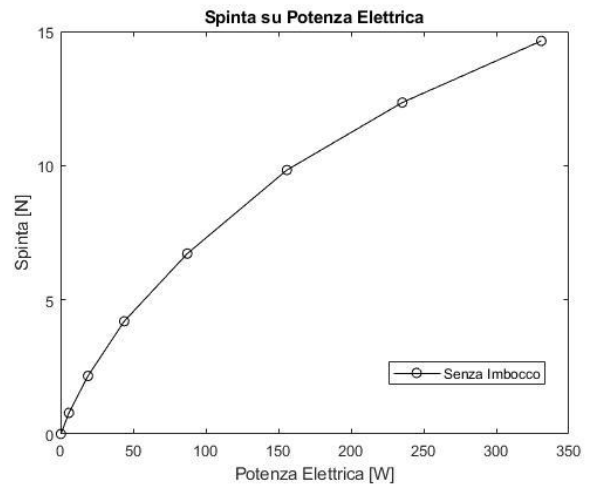


Figura 54 – Spinta su potenza elettrica, nessun imbocco

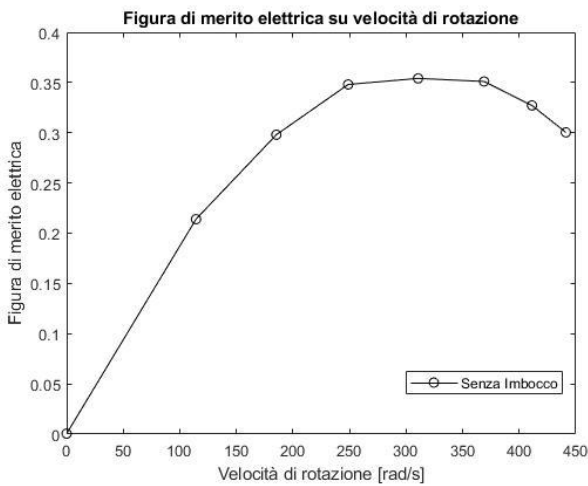


Figura 57 - Figura di merito elettrica su velocità di rotazione, nessun imbocco

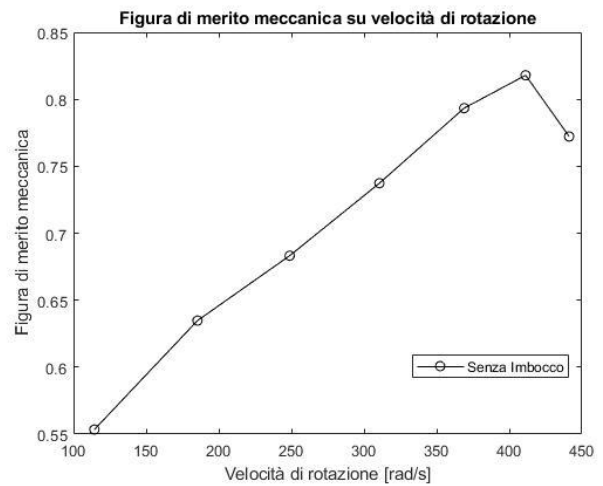


Figura 56 – Figura di merito meccanica su velocità di rotazione, nessun imbocco

3.6. Analisi e risultati imbocco α

Il secondo test è stato eseguito con il supporto di *tipo α* montato. È stato interessante osservare che l'imbocco, anche a regime massimo, si è mantenuto stabile e solido, senza innescare vibrazioni dannose e pericolose. Da notare che il rumore è profondamente cambiato rispetto alla configurazione precedente.

La configurazione del banco prova con l'imbocco *tipo α* è la seguente:

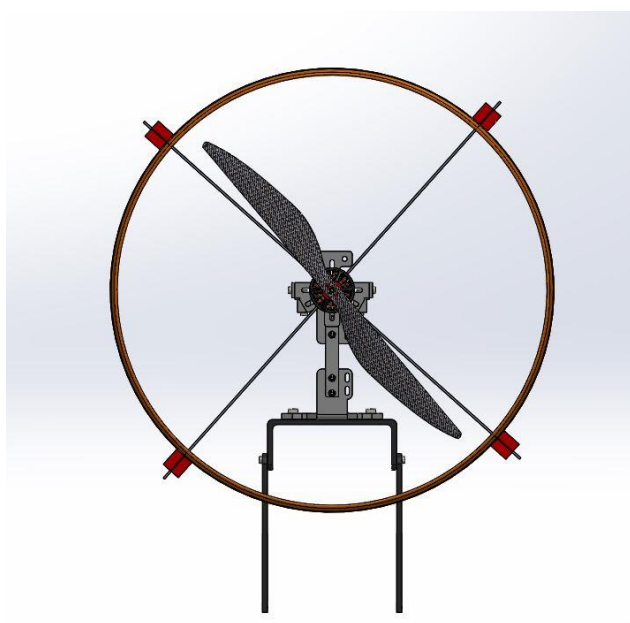


Figura 58 – Banco prova, test imbocco tipo α

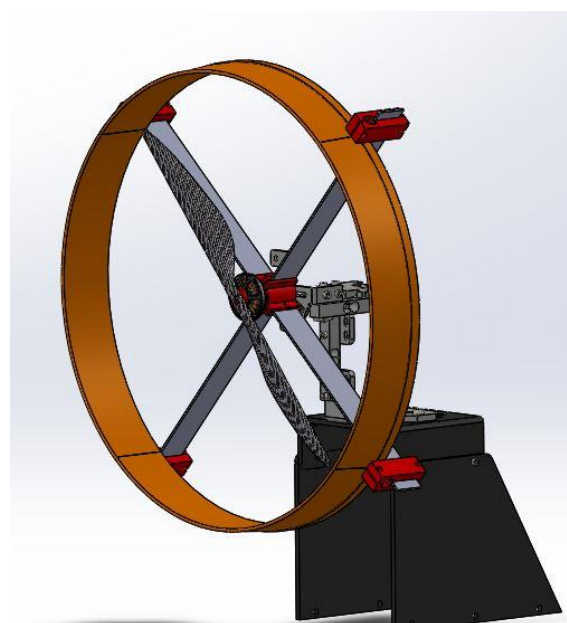


Figura 59 – Banco prova, test imbocco tipo α

I risultati ottenuti sono riportati nella tabella sottostante:

ESC signal [μ s]	Torque [Nm]	Thrust [N]	Voltage [V]	Current [A]	Optical speed [rad/s]	Electric power [W]	Mechanical Power [W]	Motor Efficiency [%]
1000	0,000	0.002	23,984	0,010	0,000	0,230	0,000	0,000
1100	0,020	0.788	23,976	0,242	114,354	5,801	2,243	38,676
1200	0,048	2,164	23,957	0,791	185,354	18,947	8,896	46,952
1300	0,090	4,201	23,924	1,834	248,814	43,877	22,354	50,950
1400	0,135	6,723	23,866	3,659	310,599	87,316	41,935	48,026
1500	0,187	9,834	23,771	6,556	368,928	155,831	68,952	44,232
1600	0,229	12,350	23,661	9,944	411,234	235,278	94,122	39,990
1700	0,292	14,646	23,527	14,070	441,184	331,010	128,743	38,896

Figura 60 - Tabella dati imbocco α

I relativi grafici:

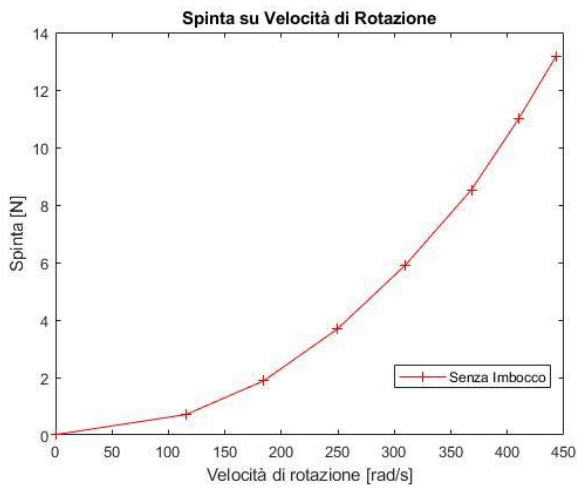


Figura 62 – Spinta su velocità di rotazione, imbocco α

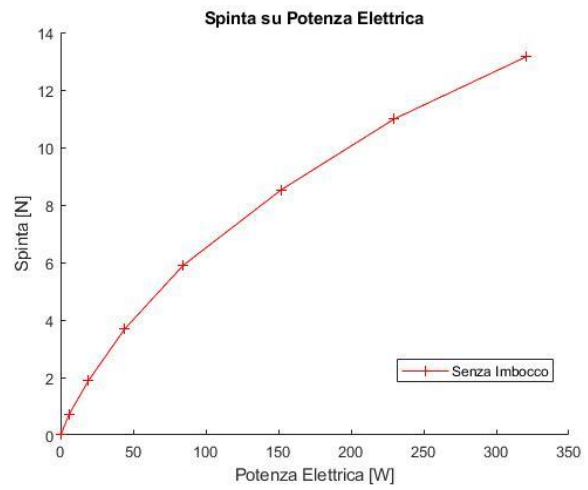


Figura 61 – Spinta su potenza elettrica, imbocco α

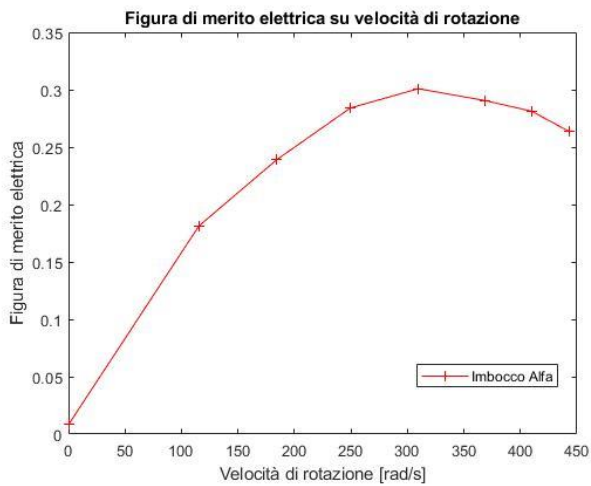


Figura 63 – Figura di merito elettrica su velocità di rotazione, imbocco α

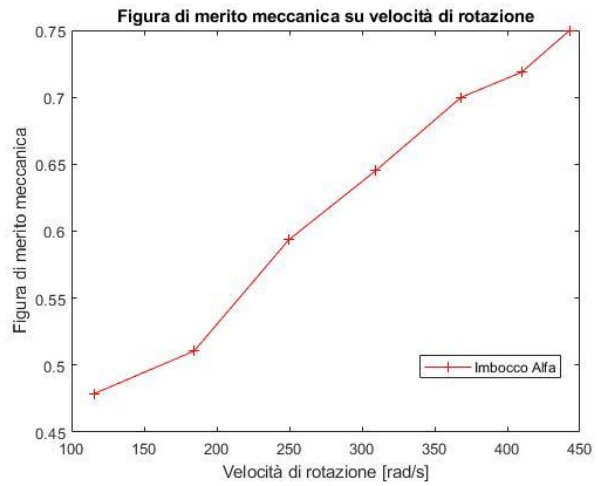


Figura 64 – Figura di merito meccanica su velocità di rotazione, imbocco α

Analisi e risultati imbocco β

Il terzo test è stato eseguito con il supporto di tipo β montato.

Anche in questo caso l'imbocco è risultato solido e adeguato all'impianto. Come nel caso precedente, il rumore è cambiato profondamente.

La configurazione del banco prova con l'imbocco *tipo* β è la seguente:

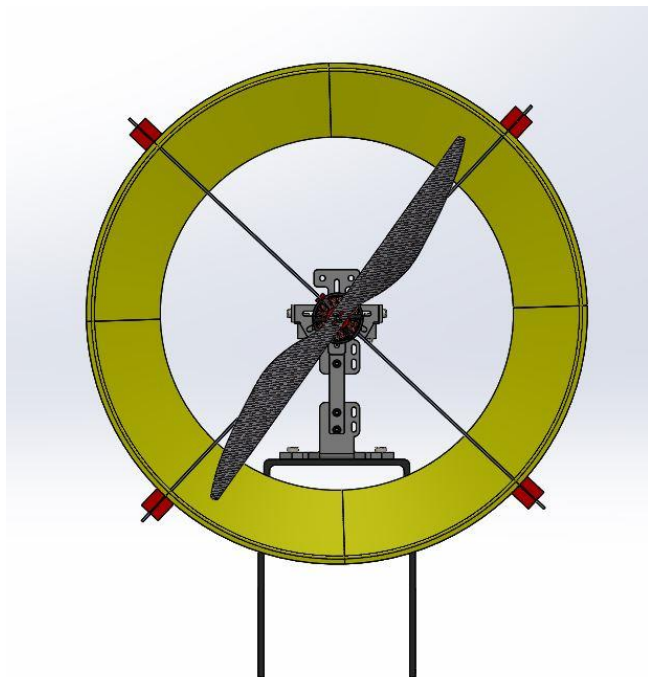


Figura 65 – Banco prova, test imbocco β

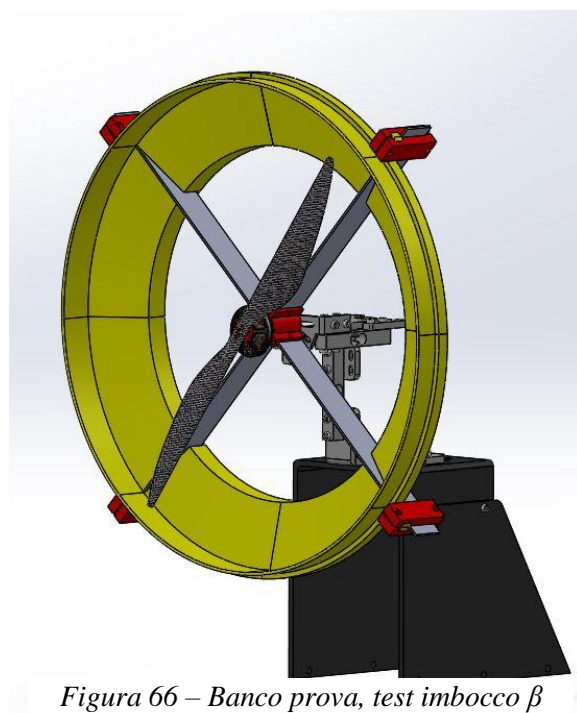


Figura 66 – Banco prova, test imbocco β

I risultati ottenuti sono riportati nella tabella sottostante:

ESC signal [μ s]	Torque [Nm]	Thrust [N]	Voltage [V]	Current [A]	Optical speed [rad/s]	Electric power [W]	Mechanical Power [W]	Motor Efficiency [%]
1000	0,000	0,001	23,984	0,002	0,000	0,049	0,000	0,000
1100	0,017	0,670	23,975	0,259	117,077	6,206	2,047	32,980
1200	0,046	1,843	23,957	0,820	187,134	19,655	8,543	43,466
1300	0,077	3,617	23,923	1,826	252,060	43,683	19,341	44,264
1400	0,108	5,690	23,863	3,463	316,149	82,637	34,146	41,312
1500	0,155	8,314	23,768	6,219	375,525	147,810	58,022	39,245
1600	0,184	10,778	23,659	9,337	421,078	220,912	77,446	35,056
1700	0,228	12,747	23,520	13,274	456,369	312,214	104,159	33,358

Figura 67 – Tabella dati imbocco β

I relativi grafici:

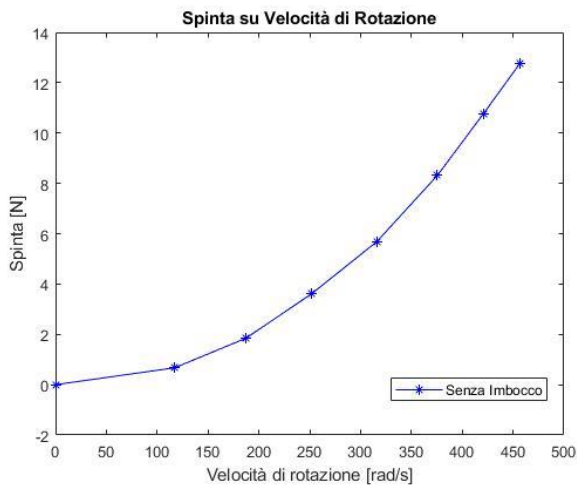


Figura 68 – Spinta su velocità di rotazione, imbocco β

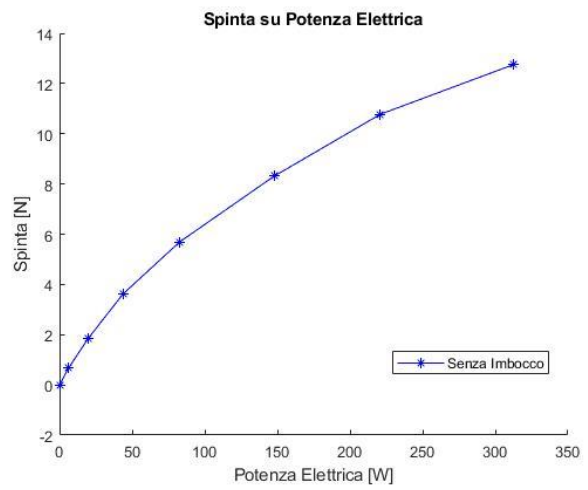


Figura 69 – Spinta su potenza elettrica, imbocco β

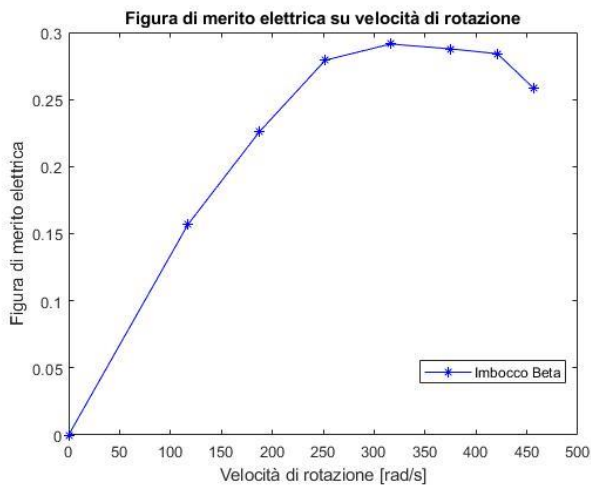


Figura 71 – Figura di merito elettrica su velocità di rotazione, imbocco β

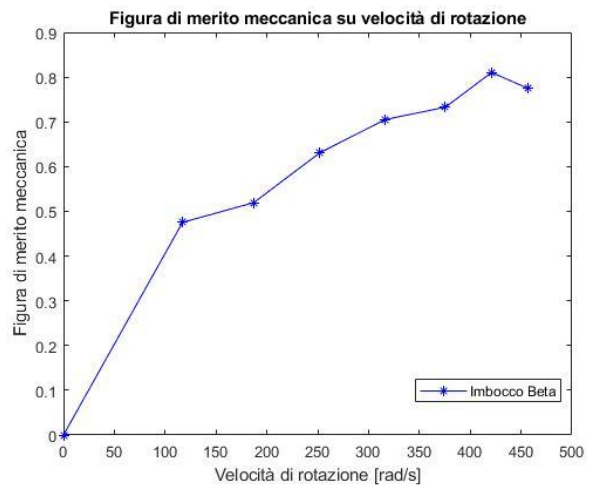


Figura 70 – Figura di merito meccanica su velocità di rotazione, imbocco β

3.7. Analisi e risultati imbocco γ

L'imbocco tipo γ è stato lasciato solo a livello progettuale. Si è preferito non realizzarlo, in quanto esso è molto simile all'imbocco di tipo β dal quale si differenzia solamente per una parte terminale più corta. Resta, comunque, valida l'idea di realizzare un tipo di imbocco rendendolo il più leggero possibile senza sacrificare le prestazioni.

Non si hanno conseguentemente dati da presentare ed eventualmente confrontare.

La configurazione del banco prova sarebbe, tuttavia, stata la seguente:

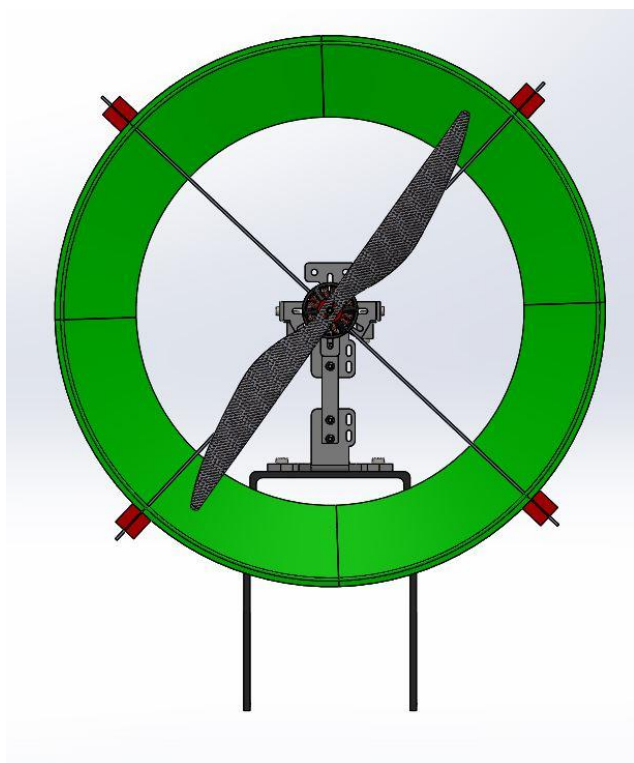


Figura 72 – Banco prova, test imbocco γ

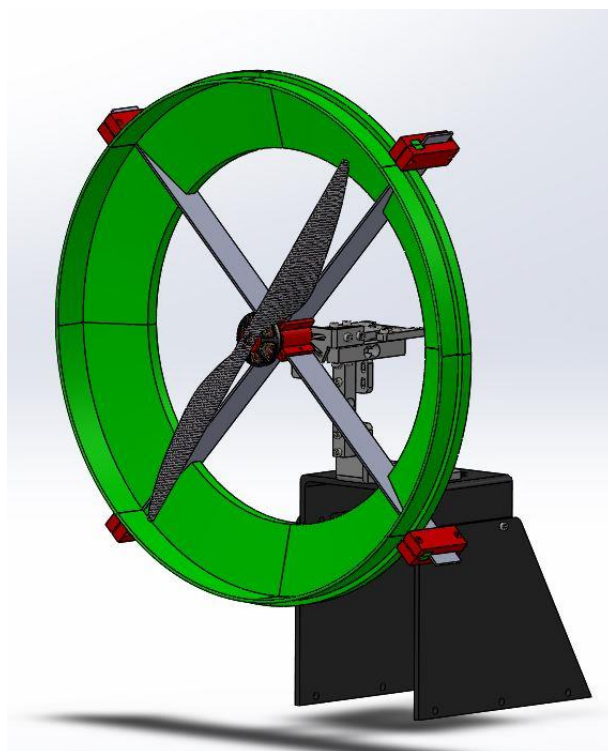


Figura 73 – Banco prova, test imbocco γ

Da queste immagini è difficile distinguere la differenza che intercorre tra tipo β e tipo γ . Per osservare meglio le differenze di tornare al paragrafo 3.2.3. per poter apprezzare in cosa si differenziano.

4. Capitolo 4

In questo capitolo sono messi a confronto i grafici precedentemente presentati per valutare in quale configurazione si siano ottenute le prestazioni migliori. In seguito, si cercherà di dare una spiegazione ai risultati presentati.

4.1. Confronto grafici

I grafici ottenuti nei paragrafi 3.5, 3.6 e 3.7 sono qui sovrapposti per poter valutare similitudini e differenze. È possibile ottenere la sovrapposizione sul software Matlab attraverso l'implementazione del comando "hold on" all'interno del codice dei grafici che esprimono le stesse grandezze.

4.1.1. Spinta su velocità di rotazione

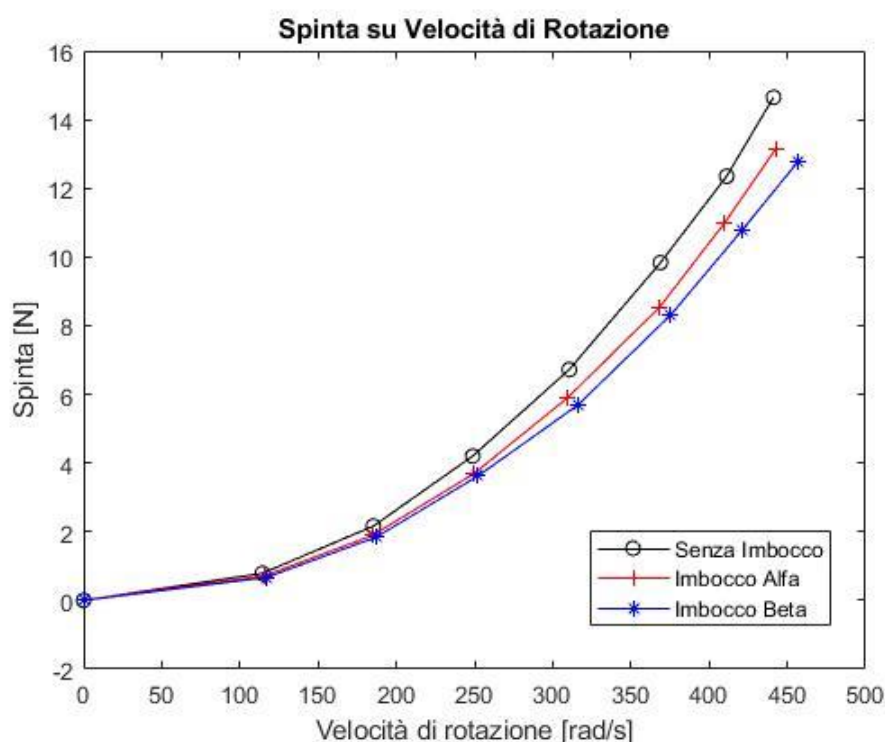


Figura 74 – Spinta su velocità di rotazione, confronto

Considerazioni: osservando il grafico in figura 74 è possibile rilevare che le prestazioni, a parità di giri, sono migliori nel test senza imbocco, seguite da quelle con imbocco di tipo Alfa e per finire quelle dell'imbocco di tipo Beta. Questi risultati sono in netta contrapposizione con i risultati presentati nel paper dei colleghi, che

mostravano l'imbocco Beta nettamente migliore sia dell'imbocco Alfa sia della configurazione senza imbocchi.

4.1.2. Spinta su potenza elettrica

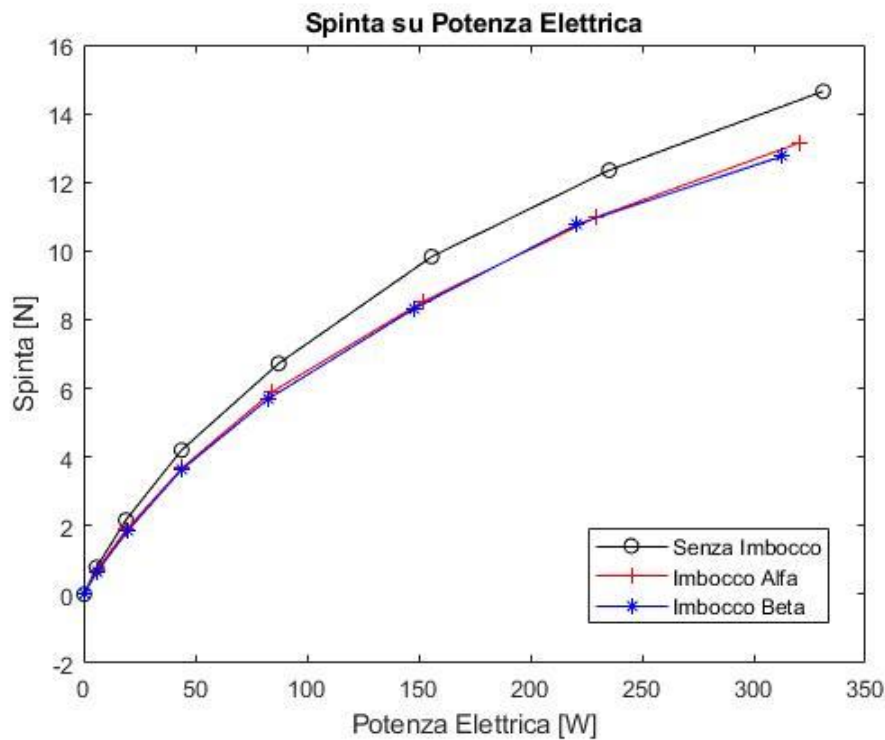


Figura 75 – Spinta su potenza elettrica, confronto

Considerazioni: analogamente al caso che precede, si osserva che la configurazione senza imbocco genera, a parità di potenza elettrica, una spinta maggiore rispetto alle configurazioni Alfa e Beta. In altri termini, i risultati ottenuti fanno ritenere che nelle conf. α e β si abbiano maggiori perdite e, quindi, a parità di spinta generata, sia necessario utilizzare una potenza elettrica maggiore.

4.1.3. Figura di merito elettrica su velocità di rotazione

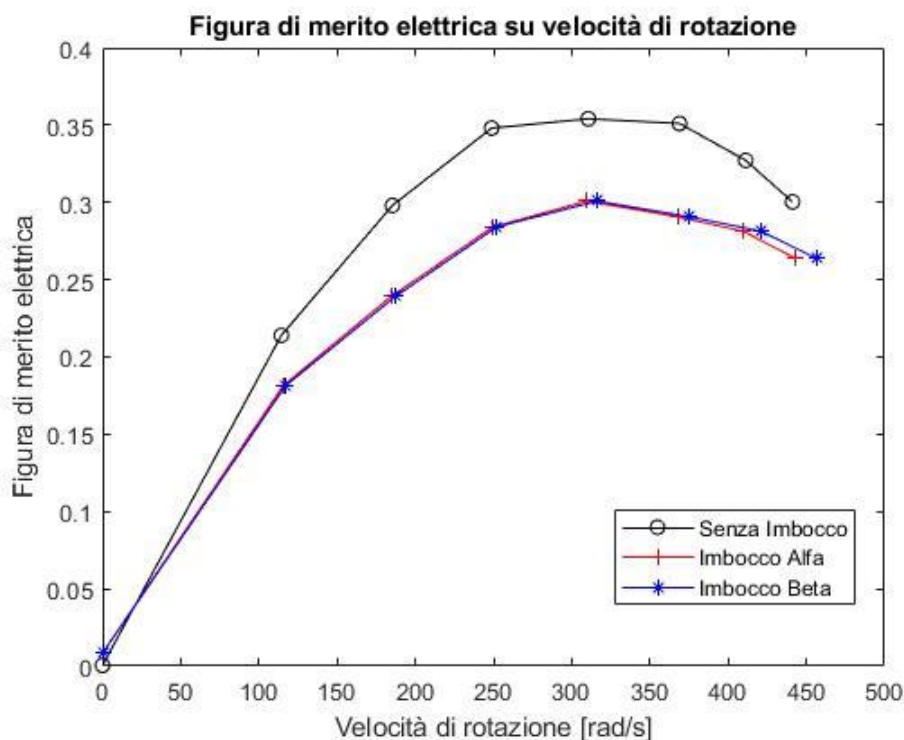


Figura 76 – Figura di merito elettrica su velocità di rotazione, confronto

Considerazioni: anche in questo caso, i risultati dall' elica senza imbocco sono migliori rispetto ai risultati ottenuti aggiungendo gli imbrocchi α e β . È possibile osservare, inoltre, che, nonostante le geometrie di α e β siano sensibilmente diverse, le loro prestazioni in termini di figura di merito elettrica sono pressoché invariate. In altre parole, la potenza elettrica P_e , assorbita dal motore, nelle configurazioni α e β è circa la medesima ed è superiore in termini quantitativi a quella della configurazione senza imbocco. Si imputa ciò alla presenza di ostruzioni (di origine fluidodinamica) al flusso nel campo di moto generato dagli imbrocchi nelle configurazioni α e β .

4.1.4. Figura di merito meccanica su velocità di rotazione

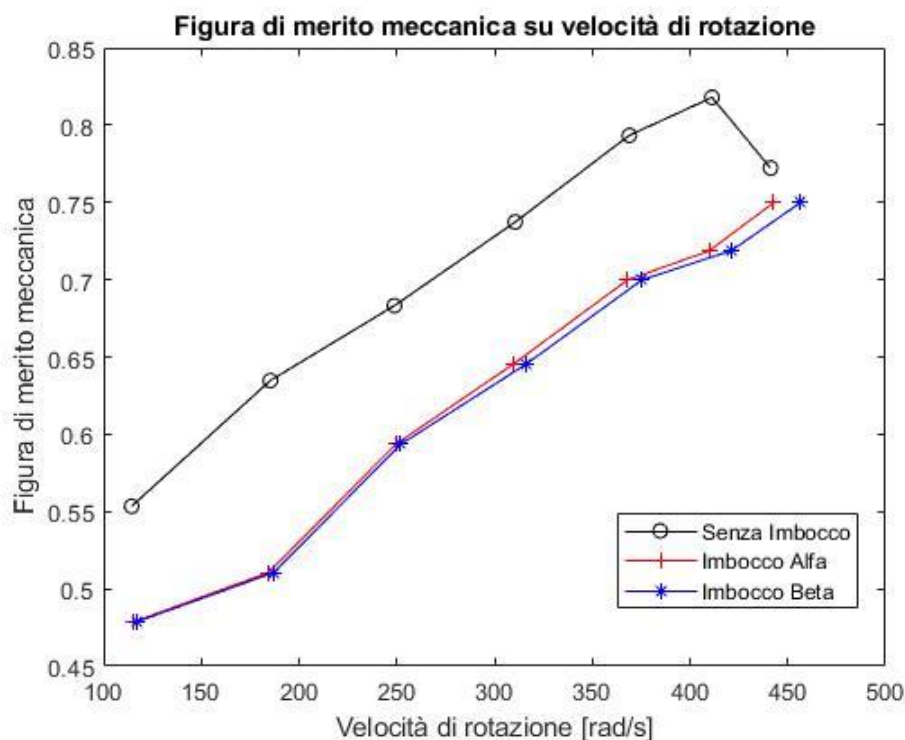


Figura 77 – Figura di merito meccanica su velocità di rotazione, confronto

Considerazioni: anche per la valutazione sperimentale della figura di merito meccanica sulla velocità di rotazione, così come negli altri tre confronti, sopra riportati, risulta evidente che le prestazioni delle configurazioni α e β sono sensibilmente inferiori a quelle dell'elica senza condotti. Si osserva che la figura di merito meccanica raggiunge valori ben più elevati rispetto a quella elettrica in tutti e tre i casi esaminati.

5. Conclusioni

L'elaborato è stato portato a termine in maniera rigorosa ed accurata, seguendo le indicazioni desumibili dallo studio rumeno, nel rispetto di tutti i parametri di partenza e delle caratteristiche tecniche riportate nel paper di confronto. Contrariamente alle aspettative e a quanto auspicabile, le analisi effettuate sono in disaccordo con quelle presentate nell'articolo della facoltà di Oradea e, pertanto, gli incrementi di spinta che si sperava di ottenere non si sono riscontrati nella pratica. I risultati portati alla luce nell'attuale studio risultano comunque validi e di grande interesse in quanto, pur non avendo dato i risultati sperati, gli imbrocchi testati non sono stati indifferenti al gruppo propulsivo. Poiché è matematicamente dimostrato che è possibile ottenere miglioramenti nel rendimento propulsivo utilizzando eliche intubate, è opportuno sfruttare le conoscenze acquisite dai test di laboratorio per migliorare le geometrie degli imbrocchi. Implementazione di geometrie più lineari e raccordate, riduzione di spazi tra imbrocchi ed eliche, utilizzo di sezioni di imbocco con profili aerodinamici sono i prossimi passi per cercare di migliorare i risultati fin qui ottenuti. Diversamente l'implementazione di imbrocchi non sarebbe altro che un incremento di peso e una conseguente perdita di prestazioni.

È necessario infine fare due considerazioni: la prima è che, anche nel caso in cui si trovasse una configurazione di imbocco che offrisse i risultati sperati, sarebbe pur sempre una configurazione ottimizzata per il volo stazionario. Sarebbe, quindi, necessario valutare l'impatto di tale sistema in un volo traslato.

La seconda considerazione è che, in ogni caso, un qualunque tipo di imbocco funge sempre da protezione alle eliche. Tale aspetto non è da considerarsi di poco conto sia come protezione delle eliche per ridurre i rischi di impatto durante il volo, sia come protezione per i soggetti che interagiscono con il drone a terra.

Indubbiamente c'è un ampio spazio per possibili sviluppi futuri.

Bibliografia

- [1] “*Quadcopter thrust optimization with ducted-propeller*”, ENDROWEDNES KUANTAMA, RADU TARCA, *Annual Session of Scientific Papers IMT ORADEA, 2017*
- [2] “*Elements of Fluid Dynamics*”, GUIDO BURESTI, Imperial College Press, 2012.
- [3] “*Meccanica del volo*”, CARLO CASAROSA, Pisa University Press, 2013.
- [4] “*Rotary Wing Flight*”, NICHOLAS EAN, Aviation Supplies & Academics, 2010.
- [5] “*Principles of Helicopter Flight*”, WALTER J. WAGTENDONK, Second edition, Aviation Supplies & Academics, 2006.
- [6] “*PROPULSIONE DEGLI ELICOTTERI*”, VITTORIO FIORINI, Istituto Bibliografico Napoleone, 2003.
- [7] “*Fondamenti di MECCANICA*”, ANTONIO BERTIN, MARIO POLI, ANTONIO VITALE, Società Editrice Esculapio, 2003.
- [8] “*Appunti di Aerodinamica degli Aeromobili*”, ALESSANDRO TALAMELLI, 2015/2016.
- [9] “*Appunti di Meccanica del Volo*”, GIULIETTI FABRIZIO, EMANUELE L. DE ANGELIS, 2015/2016.
- [10] “*Impianti Aerospaziali*”, PAOLO TORTORA, 2014/2015.
- [10] “*Appunti di propulsione a pistoni e eliche*”, GIORGIO MINELLI, 2014/2015.

Sitologia

- [1] <http://www.rctimer.com/>
- [2] <https://www.tek.com/keithley>
- [3] <https://it.wikipedia.org/>
- [4] <https://www.baronerosso.it/>
- [5] <https://studiulm.blogspot.com/p/t-11-teoria-del-disco-attuatore-in.html>
- [6] <https://www.appuntidigitali.it/18254/sistemi-propulsivi-aeronautici-elica-e-sue-caratteristiche/>
- [7] <http://store-en.tmotor.com/>
- [8] <https://jumpjack.wordpress.com/2012/06/09/batterie-e-tecnologie/>
- [9] <https://www.arduino.cc/>
- [10] <https://hobbyking.com/>
- [11] <http://www.gaapallini.it/index.php/notizie/notizie-dal-campo/8-guide-e-manuali/9-il-volo-eettrico?showall=1>
- [12] <https://www.youtube.com/>
- [13] https://www.electroyou.it/vis_resource.php?section=DomRisp&id=732
- [14] <https://www.rcbenchmark.com/>
- [15] <http://www.treccani.it/>

Ringraziamenti

A valle di questo percorso di studio sono doverosi i ringraziamenti per tutti coloro che hanno partecipato, contribuito o remato contro questo mio personale successo.

In primo luogo, è necessario ringraziare Zephyr Srl e il personale del team di meccanica del volo: il Professor Giulietti Fabrizio, il dottor Rossetti Gianluca e il dottor Turci Matteo. Senza di voi non sarebbe stato possibile portare a termine il mio lavoro.

In secondo luogo, ringrazio la mia famiglia, che mi ha spronato ad arrivare sin qui (ciascuno a suo modo), e in particolare mio padre, che è andato a rispolverare certe conoscenze di Fisica per ben troppi pomeriggi, e mia madre, con le sue innate doti di traduttrice di pensieri confusi in tesi leggibile (se avete capito ciò che avete letto, è principalmente grazie a lei).

Un grandissimo ringraziamento va ora alla persona che più di tutte mi è stata sempre vicina: la mia ragazza, complice.

È stata la miglior compagna, nello studio, e nella vita. Mi sei stata accanto nelle gioie e nei dolori, nei momenti belli e in quelli in cui è meglio berci sopra.

Grazie, Glo, di esserci sempre stata. Grazie di avermi sgridato e grazie di avermi amato.

Non avrei mai potuto essere chi sono oggi, senza di te. Ti amo tanto.

Un grazie speciale anche a tutti coloro che in questi anni mi sono stati vicini: gli amici e i compagni di studio. È merito anche vostro se oggi siamo qui, d'altra parte.

Ringrazio chi non credeva che avrei potuto diventare ingegnere, chi mi disse che per me era sempre domenica e chi ha fatto di tutto per intralciare il mio percorso.

Grazie a loro sono più consapevole delle mie capacità.

Per concludere, e scusate la prolissità, ringrazio la mia X-Box.

È principalmente merito suo se oggi mi laureo, con imbarazzante ritardo.