

# Rapporti tecnici INGV

Verso un multirottore a lunga durata

# 307



## **Direttore Responsabile**

Stefano Gresta

## **Editorial Board**

Luigi Cucci - Editor in Chief (INGV - RM1)

Andrea Tertulliani (INGV - RM1)

Nicola Pagliuca (INGV - RM1)

Umberto Sciacca (INGV - RM2)

Alessandro Settimi (INGV - RM2)

Aldo Winkler (INGV - RM2)

Salvatore Stramondo (INGV - CNT)

Milena Moretti (INGV - CNT)

Gaetano Zonno (INGV - MI)

Viviana Castelli (INGV - BO)

Antonio Guarnieri (INGV - BO)

Mario Castellano (INGV - NA)

Mauro Di Vito (INGV - NA)

Raffaele Azzaro (INGV - CT)

Rosa Anna Corsaro (INGV - CT)

Mario Mattia (INGV - CT)

Marcello Liotta (INGV - PA)

## **Segreteria di Redazione**

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Barbara Angioni

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it

# Rapporti tecnici INGV

## VERSO UN MULTIROTORE A LUNGA DURATA

Giovanni Romeo

INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Sismologia e Tettonofisica)

# 307



## **Indice**

Introduzione	7
1. Eliche	7
2. Una considerazione sui motori	14
3. Volare o cadere con stile, la meraviglia dell'aliante	15
Bibliografia	15
Sitografia	15



## Introduzione

Quelle che seguono sono delle considerazioni da laboratorio di fisica, scritte cercando di dedurre quello che un ingegnere aeronautico saprebbe già da subito. Mi sono messo a fare questi conti nell'intento di aumentare l'autonomia del multirottore usato su LuSi (il vulcano di fango nella parte orientale di Java) cercando di capire quali parametri sia possibile modificare nel disegno per ottenere un tempo di volo decente. Tempo di volo significa non solo esplorare una superficie maggiore, ma anche riuscire ad avere una stazione base piazzata in un punto accettabile. Significa passare da così (fig. 1 sinistra) a così (fig. 1 destra). Tutte le considerazioni assumono come dato sperimentale la tabella 1, relativa al motore T-MOTOR U8 KV100, in fondo all'articolo, che è stato selezionato come motore per il progetto del drone ad alta autonomia. Man mano che si procede nelle considerazioni teoriche la tabella viene presa in considerazione per una verifica numerica, a conforto del lettore (e, soprattutto, mio!).

Vorrei essere perdonato per la bibliografia piuttosto scarna ma, a parte le conoscenze pregresse di fisica, il mio studio sull'argomento è stato fatto piluccando notizie dalla rete, costantemente in contatto con il mondo in rapidissima evoluzione dei volatori automatici. L'unico testo di carta consultato è il libro del mio amico e collega dell'INGV, Carlo Salvaterra.



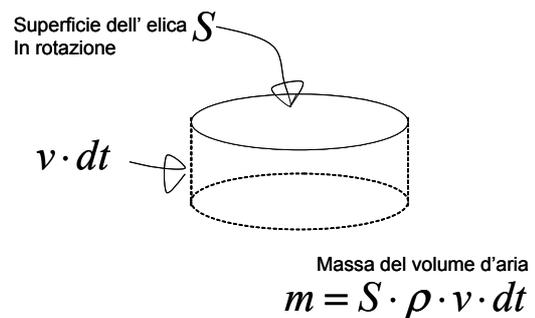
**Figura 1.** A sinistra la stazione base nella missione 2014 su LuSi (400 m dal cratere), a destra gli uffici del BPLS, (agenzia governativa indonesiana), ad 1 km dal cratere.

## 1. Eliche

Quello che fa un'elica è spingere l'aria. L'accelerazione imposta all'aria produce una forza e sostiene il nostro velivolo.

L'elica in rotazione può essere schematizzata come un disco in grado di imprimere una velocità all'aria. Partiamo dal secondo principio della dinamica:

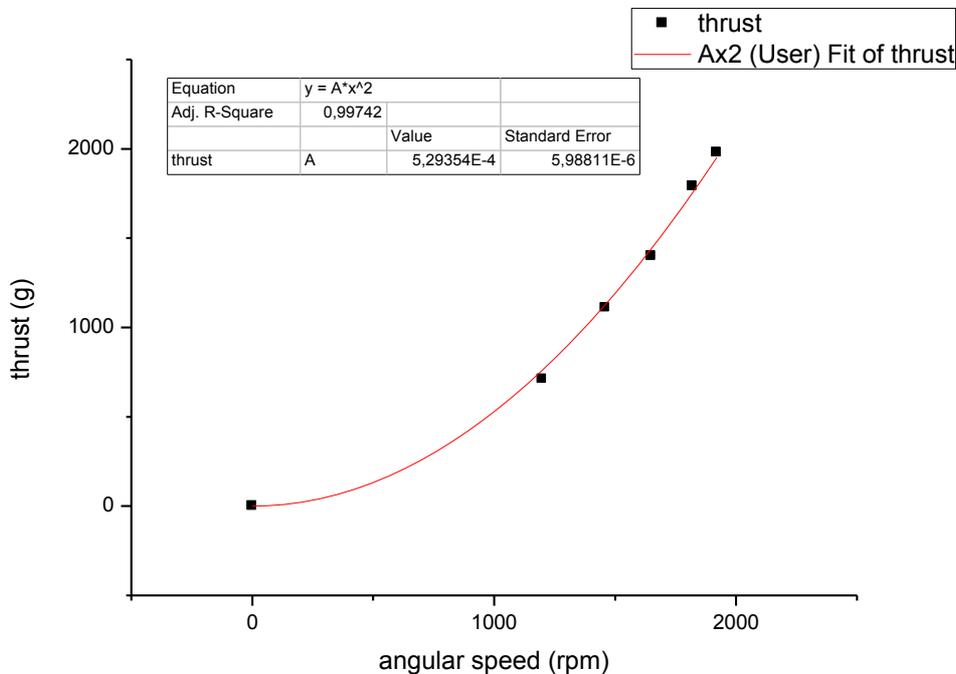
$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (1)$$



Sostituendo la massa del volume d'aria con il valore scritto in funzione della superficie dell'elica, della densità dell'aria e della velocità abbiamo:

$$\vec{F} = S \cdot \rho \cdot v \cdot dt \frac{v - v_0}{dt} = S \cdot \rho \cdot v \cdot dt \frac{v}{dt} = k \cdot v^2 \quad (2)$$

Assumendo che l'incremento di velocità sia fisso, passando da aria ferma (a monte dell'elica,  $v_0$ ) ad aria a velocità  $v$  a valle dell'elica. Un po' forzato<sup>1</sup>, ma ci dà un'idea della forma di quello che ci aspettiamo. Nella (2) abbiamo inglobato le dimensioni dell'elica e la densità dell'aria in un'unica costante  $k$  che ha le dimensioni di una massa divisa una lunghezza. La figura 2 mostra la regressione dei punti dichiarati da t-motors per il motore u8-kv100 con elica da 26'' con la funzione (2), a dimostrazione che la medesima descrive un caso reale. Le eliche vengono identificate con due numeri che sono la misura in pollici della lunghezza dell'elica (il diametro del disco dell'elica) ed il passo cioè lo spazio che l'elica percorrerebbe avvitandosi nel fluido con una rivoluzione completa. In questo modo la velocità dell'aria (in m/s) all'uscita dall'elica si ottiene moltiplicando il passo espresso in metri per la velocità angolare (espressa in giri/sec).



**Figura 2.** La regressione dei dati del motore con un'elica da 26\*8.5'' sul motore u8-kv100 a dimostrazione della validità della (2).

Per quanto riguarda la potenza richiesta per ottenere la spinta questa coinvolge considerazioni meccaniche ed elettriche. Trascuriamo quelle elettriche, visto che la tabella 1 considera l'insieme motore-elica.

<sup>1</sup> L'assunto che  $V - V_0 = V$  è impreciso. Ma, assumendo che  $V$  e  $V_0$  siano proporzionali tutte le considerazioni che faremo saranno corrette a meno di un fattore che possiamo considerare inglobato in  $k$ .

Item No.	Volts (V)	Prop	Throttle	Amps (A)	Watts (W)	Thrust (G)	RPM	Efficiency (G/W)	Operating temperature( °C)
U8 KV100	22.2	T-MOTOR 26*8.5CF	50%	1.6	35.52	710	1200	19.99	38
			65%	2.7	59.94	1110	1460	18.52	
			75%	3.8	84.36	1400	1650	16.60	
			85%	5.1	113.22	1790	1820	15.81	
			100%	5.9	130.98	1980	1920	15.12	
		T-MOTOR 27*8.8CF	50%	1.7	37.74	770	1160	20.40	38
			65%	3	66.6	1200	1430	18.02	
			75%	4	88.8	1530	1620	17.23	
			85%	5.4	119.88	1880	1790	15.68	
		T-MOTOR 28*9.2CF	50%	1.8	39.96	860	1130	21.52	40
			65%	3.3	73.26	1300	1400	17.75	
			75%	4.6	102.12	1660	1580	16.26	
	85%		6.2	137.64	2100	1730	15.26		
	T-MOTOR 29*9.5CF	50%	2	44.4	930	1100	20.95	41	
		65%	3.8	84.36	1530	1380	18.14		
		75%	5.2	115.44	1870	1550	16.20		
		85%	7.1	157.62	2320	1700	14.72		
	44.4	18x6 wood prop	50%	1.4	62.16	780	2580	12.55	42
			65%	2	88.8	1070	3000	12.05	
			75%	2.5	111	1280	3350	11.53	
85%			3.5	155.4	1630	3720	10.49		
100%			4.6	204.24	2020	4120	9.89		
20x6 wood prop		50%	1.5	66.6	820	2420	12.31	43	
		65%	2.4	106.56	1230	2930	11.54		
		75%	3.2	142.08	1550	3260	10.91		
		85%	4.3	190.92	1920	3750	10.06		
22x6 wood prop		50%	1.9	84.36	1100	2350	13.04	45	
		65%	3.4	150.96	1720	2850	11.39		
		75%	4.4	195.36	2130	3200	10.90		
		85%	6	266.4	2660	3530	9.98		
		100%	8.1	359.64	3330	3900	9.26		

Notes: The test condition of temperature is motor surface temperature in 100% throttle while the motor run 10 min.

**Tabella 1.** Dal sito [www.rctigermotor.com](http://www.rctigermotor.com).

Per il caso meccanico possiamo partire scrivendo la forma dell'energia che viene somministrata ad un cilindro di aria di volume  $S \cdot v \cdot dt$  nel tempo  $dt$ , e considerando che la potenza è l'energia impiegata per unità di tempo:

$$dE = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v \cdot dt \cdot v^2$$

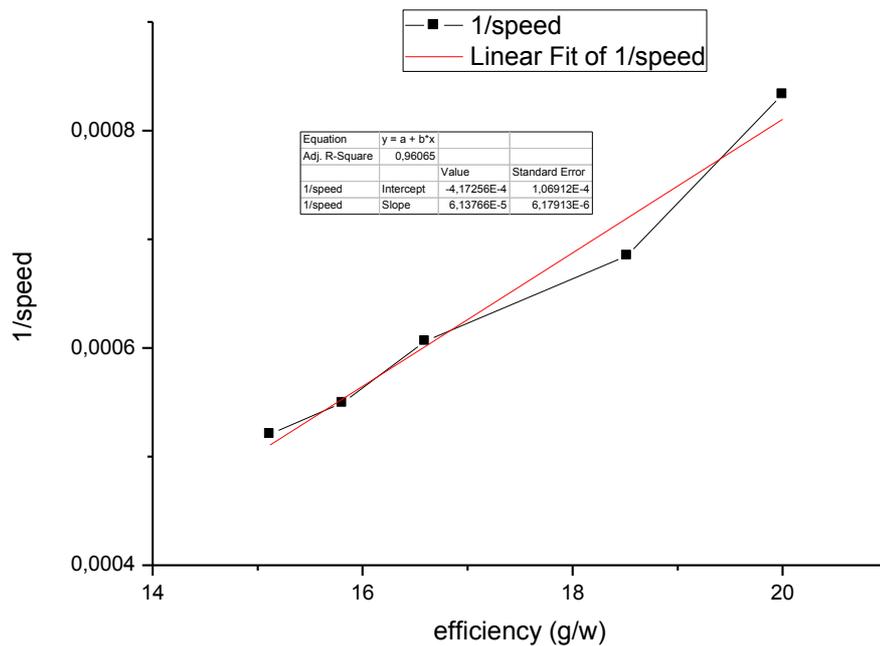
$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (3)$$

Dalle (3) e dalle (2) possiamo fare una considerazioni sul rapporto spinta/potenza, che è quello che ci interessa nel valutare la durata di un volo:

$$\frac{F}{P} = \frac{S \cdot \rho \cdot v^2}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3} = \frac{2}{v} \quad (4)$$

La (4) ci dice che il rapporto forza/potenza è tanto più grande quanto più piccola è la velocità dell'aria attraverso il disco dell'elica. A parità di spinta la (2) ci dice che, se vogliamo diminuire la velocità dovremo aumentare il volume dell'aria spinta, e, quindi, il diametro dell'elica. Un multirottore di grande autonomia dovrà avere eliche grandi e lente.

Se assumiamo la velocità di rotazione proporzionale alla velocità dell'aria possiamo verificare la bontà della (4) paragonandola ai dati della tabella 1. Nella fig. 3 è riportata l'efficienza (ridefinita come spinta/potenza) con elica da 26'' in funzione dell'inverso della velocità (in RPM).



**Figura 3.** Dati dell'efficienza dell'elica da 26\*8.5'' sul motore u8-kv100 paragonati all'inverso della velocità. La ragionevole qualità della regressione lineare conferma che l'andamento è conforme alla (4).

Nel calcolo dell'autonomia un'importanza notevole ha l'espressione della forza in funzione della potenza. Possiamo ricavarla così:

Dalla (4) otteniamo v:

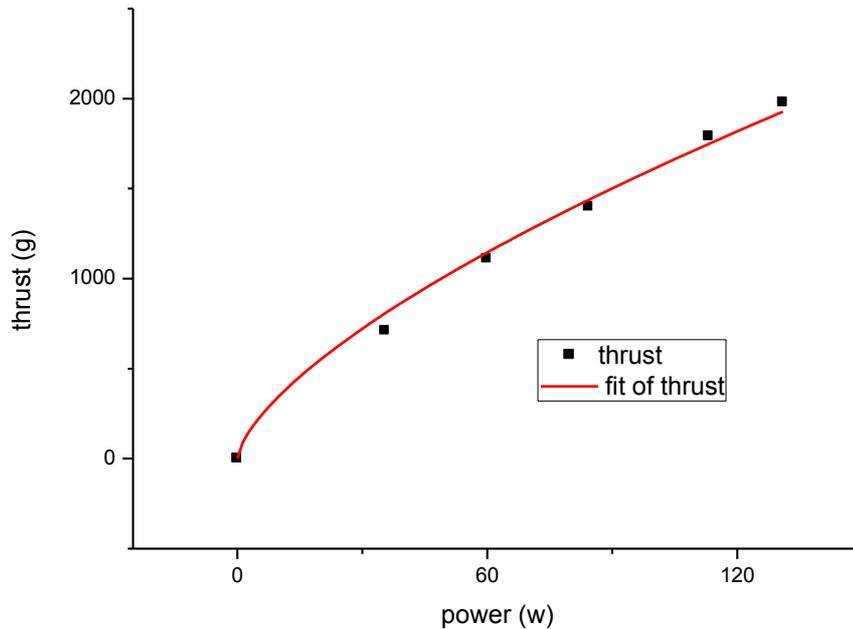
$$\frac{F}{P} = \frac{2}{v} \Rightarrow v = \frac{2P}{F}$$

Che possiamo inserire nella (2)

$$F = k \left( \frac{2P}{F} \right)^2 \Rightarrow \sqrt[3]{4kP^3} \quad (5)$$

Dove, come nella (2),  $k = \rho \cdot S$ .

Anche la (5) produce una ragionevole curva di regressione confrontata con i valori della tabella 1 (elica da 26\*8.5" sul motore u8-kv100), come mostrato in fig.4. In questo caso alla tabella è stata aggiunta artificialmente la coppia di valori (0,0), assumendo che, per qualunque legge che possa legare la potenza alla spinta, per potenza nulla la spinta debba essere nulla.



**Figura 4.** Curva di regressione della (5) con i dati dell'elica da 26\*8.5" sul motore u8-kv100 (tabella 1).

Il valore di  $\sqrt[3]{4k}$  dedotto dalla regressione di fig 4 è:

$$\sqrt[3]{4k} = 74.7 \pm 1.3 N \cdot W^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

dove sono utilizzate le unità di misura della tabella 1.

In realtà non mi sono preoccupato troppo di verificare che il valore di  $k$  dedotto dalla regressione coincidesse con i valori fisici racchiusi nella costante. Probabilmente, se lo avessi fatto sarei stato deluso: ci comportiamo come se l'elica fosse priva di attrito e come se all'aria venisse impressa solo una spinta ortogonale al disco dell'elica, il che non è. Inoltre la potenza desunta dalla tabella è la potenza elettrica assorbita dal complesso esc→motore→elica e non solo la potenza meccanica assorbita dall'elica. Quindi, benché la regressione ci confermi che la forza è proporzionale alla potenza  $^{2/3}$ , il coefficiente di proporzionalità non ha certo la forma semplice che gli abbiamo attribuito.

La cosa che ci preme ottenere è il tempo di volo in funzione del carico e del peso delle batterie, e per questo basta quello che abbiamo trovato con la regressione. La stima del tempo di volo sul campo, ci è utile per valutare se riusciamo o meno a fare il volo programmato. In fase di progetto ci è utile parametrizzare il tempo di volo con il numero dei motori.

La (5) può essere riscritta come potenza in funzione della forza:

$$P(F) = 1.540 \cdot 10^{-3} \cdot F^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

Il peso del multirobotore in studio è stato scomposto nel peso delle sue parti. Dove non è specificato il valore che assumiamo è quello descritto nella tabella 2,

Nome	Significato	Valore
<i>en</i>	Numero di motori	4
<i>eng_w</i>	Peso di un motore	250 g
<i>prop_w</i>	Peso di un'elica	75 g
<i>arm_w</i>	Peso di un braccio	100 g
<i>frame_w</i>	Peso telaio	200 g
<i>batt_eff</i>	Efficienza batteria	160 Wh/kg
<i>pay_w</i>	Catlico utile	1500 g
<i>batt_w</i>	Peso batteria	variabile

**Tabella 2.** Elenco delle variabili introdotte per stimare il peso ed il tempo di volo di un multirobotore. Il valore che assumiamo nei calcoli, ove non altrimenti specificato, è quello che appare nella tabella.

dove un ruolo fondamentale è giocato dalla efficienza della batteria, *batt\_eff* espressa in Wh/kg, che ci permette di conoscere l'energia che ci portiamo dietro moltiplicando il peso delle batterie per l'efficienza: più batterie, più energia ma anche più peso.

Il peso del telaio è stato suddiviso in *frame\_w* (parte centrale e carrello di atterraggio) più *payload*, mentre il peso dei bracci dei motori e delle eliche varia in funzione dei motori dei quali dotiamo il velivolo.

La potenza necessaria per sostenere il multicottero la possiamo ottenere utilizzando la (6) così:

$$P_{totale} = P\left(\frac{peso\_totale}{en}\right) \cdot en$$

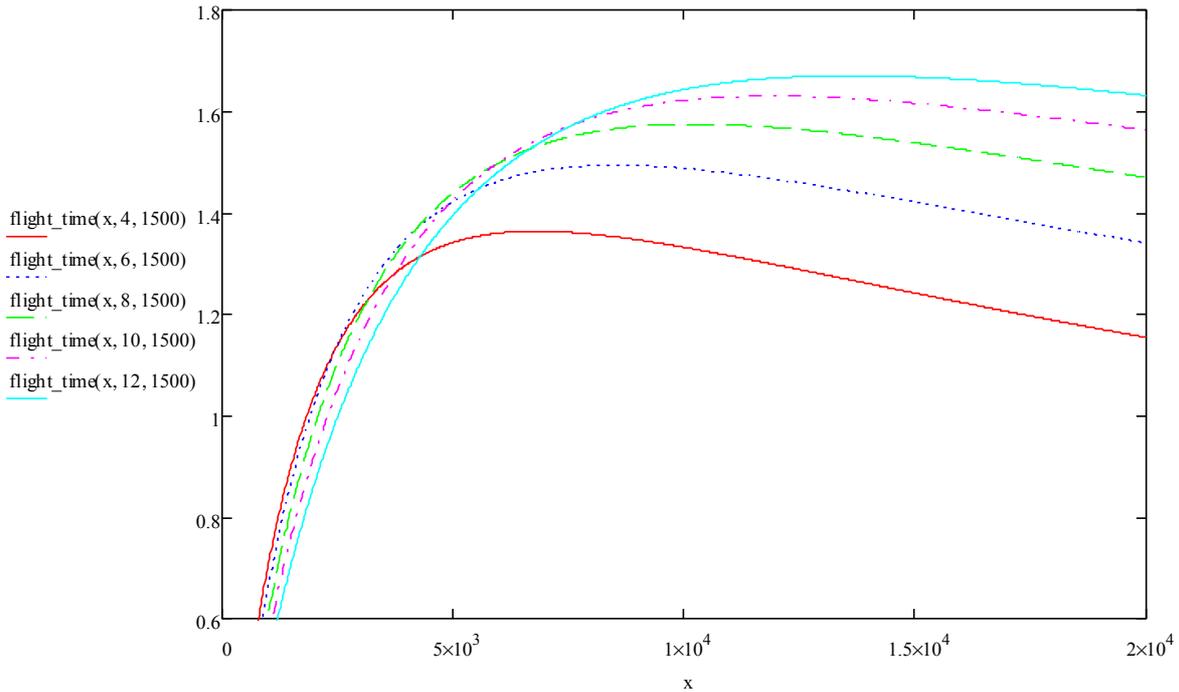
Dove la funzione  $P(x)$  è descritta nella (7).

Il tempo di volo, inteso per *hovering*, è dato da:

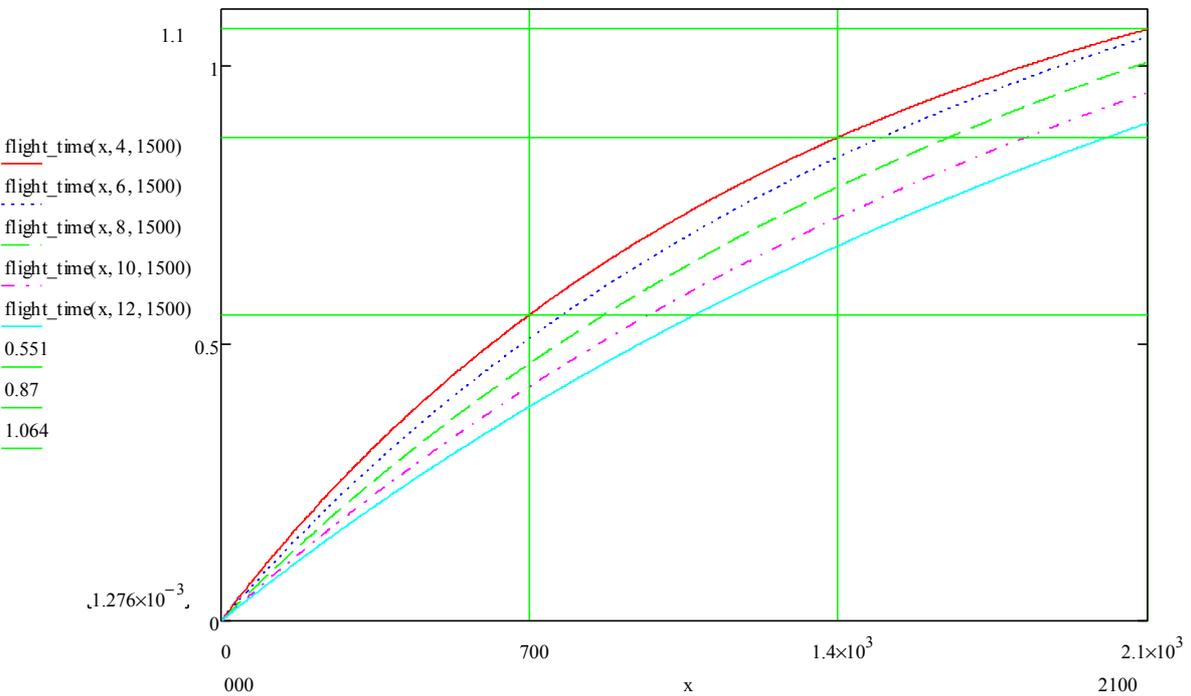
$$flight\_time(batt\_w, en, pay\_w) = \frac{\cdot batt\_eff \cdot batt\_w}{1000 \cdot P\left(\frac{en(eng\_w + arm\_w + prop\_w) + frame\_w + batt\_w + pay\_w}{en}\right)} \quad (8)$$

La fig. 5 mostra il diagramma della (8), con un *payload* (*pay\_w*) di 1500 g, parametrizzato con il numero dei motori e per un peso delle batterie fino a 20 Kg. Quello che si nota immediatamente è che l'aumento delle dimensioni della batteria, oltre un certo limite è controproducente.

La fig. 6 mostra l'ingrandimento della fig 5 (fino a 2100) kg, con evidenziate le linee a 700, 1400 e 2100 g, (un pacco batterie lipo 6s 5Ah pesa 700g).



**Figura 5.** Tempo di volo in funzione della potenza, calcolato per differenti numeri di motori. Da notare che, oltre un certo valore, l'aumento delle dimensioni delle batterie è svantaggioso.



**Figura 6.** Il tempo di volo in funzione del peso delle batterie, evidenziando i pesi corrispondenti ad 1, 2 e 3 pacchi batterie 6s 5Ah (circa 700 g per pacco), che corrispondono a durate del volo di 33, 52 e 63 minuti.

L'esame delle figg. 5 e 6 ci convince che, a meno che non si abbiano particolari esigenze di carico l'uso del più basso numero di rotori è preferibile (prescindendo da considerazioni di affidabilità: un quadrirotore non vola con un rotore in meno, un esarotore sì). L'efficienza delle batterie gioca un ruolo

fondamentale. Le lipoly danno generalmente 160Wh/kg, ma esistono batterie (come le GEB8043125), che offrono efficienze di 260 Wh/kg, al prezzo di una corrente di scarica bassa (1C con burst di 2C<sup>\*2</sup>). Il multirottore ipotizzato nell'articolo ottempera a questa richiesta di corrente.

Un pacco batterie di questo tipo in commercio offre le seguenti caratteristiche:

6s (6 cells)  
6000 mAh  
22.2 volts  
548 grams

Con 2 e 4 pacchi batterie, la (8) ci dà questi risultato:

$$flight\_time(548 * 2,4,1500) = 1.22h$$

$$flight\_time(548 * 4,4,1500) = 1.76h$$

valori che cominciano ad essere ragionevoli.

## 2. Una considerazione sui motori

Il comportamento del motore è stato trascurato perché è incluso nella tabella 1, e vi è nascosto così bene che ci siamo comportati come se quello che fa il motore fosse trascurabile. Il motore elettrico si basa sulla forza indotta da un campo magnetico su un filo percorso dalla corrente, la corrente è proporzionale alla forza sul filo, e sul filo nasce una differenza di potenziale proporzionale alla velocità del filo nel campo magnetico. Se il motore è composto esclusivamente dagli avvolgimenti di rame (oltre che da ciò che genera il campo magnetico) la prima perdita che ci viene in mente è quella causata dalla corrente sulla parte ohmica dell'avvolgimento. Se pensiamo che il rame sia avvolto su un supporto ferromagnetico (il che aumenta la forza per unità di corrente nell'avvolgimento) la seconda causa perdita è quella causata dal ripetersi dei cicli di isteresi, proporzionali alla profondità dell'isteresi (corrente), ed alla velocità con cui questi si ripetono (velocità del motore). In prima approssimazione

$$\begin{aligned} Copper\_loss &\propto I^2 \\ Iron\_loss &\propto I \cdot v \end{aligned} \quad (9)$$

Siccome in un motore la corrente è proporzionale alla coppia, il termine di perdita nel rame ci dice che la perdita del motore è proporzionale al quadrato della coppia. La perdita nel ferro è proporzionale al prodotto coppia velocità, che esprime la potenza meccanica erogata. Quindi, linearmente, più potenza, più perdita. Questa proporzionalità non ci aiuta a scegliere il miglior punto di funzionamento per un dato motore, ci dice solo di scegliere un motore migliore. Quindi se vogliamo che un dato motore renda di più dovremo diminuire la coppia, il che, a parità di potenza, significa aumentare la velocità. L'aumento della velocità si scontra con quanto considerato nella (4) dove mostriamo che le eliche grandi e lente offrono un miglior rendimento in *hovering*. Questa cosa può essere conciliata dall'uso di un riduttore di velocità ad ingranaggi, in modo da trasferire all'elica una potenza ad alta coppia e bassa velocità a partire da un motore ad alta velocità, oppure da motori progettati appositamente per fornire alte coppie, come quelli selezionati dalla produzione T-motors.

---

<sup>2</sup> La corrente di scarica della batteria viene indicata con nC, dove C è il prodotto della capacità (espressa in Ah) per tempo (in h), quindi le GEB8043125, dove n=1 potranno fornire 6A (con assorbimenti istantanei di 12A).

### 3. Volare o cadere con stile, la meraviglia dell'aliante

Sempre per il fatto di non essere un ingegnere aeronautico capisco poco di macchine volanti, ma riesco a capire che cosa fa un corpo rigido quando gli applichiamo un po' di forze e un po' di coppie. Per questo una parte di me predilige i multirotori, che stanno a mezz'aria con una sapiente ricetta di forza bruta e teoria dei sistemi, mentre l'altra non può far a meno di ammirare i volatori veri.

Un aliante sta al multirottore come un gabbiano sta a Buzz Lightyear. Un aliante, la macchina volante più aggraziata che esista, del peso, diciamo, di 300 kg, può percorrere, planando, 50km per ogni km di perdita di quota, ad una velocità di 150 km/h. Immaginiamo un aliante che voli ad una quota di 1 km, e che atterri più o meno alla velocità di crociera, quindi senza variazioni dell'energia cinetica. La velocità di discesa è  $(150/50)=3$  km/h, e l'aliante impiega 20 minuti per perdere il suo km di quota ed atterrare. L'energia che abbiamo fornito all'aliante è l'energia potenziale che viene usata per mantenere l'aliante in volo e che, per i 20 minuti del volo, corrisponde ad una potenza di

$$300 \cdot 9.8 \frac{1000}{20 \cdot 60} = 2.45 \times 10^3 \quad \text{Watt}$$

Per ottenere la stessa spinta con i motori presi in esame avremmo dovuto, mettendoci nelle migliori condizioni, di 20 g/w, impiegare una potenza di:

$$\frac{300}{0.02} = 1.5 \times 10^4 \quad \text{Watt}$$

Circa un ordine di grandezza di più. Questa grande differenza la dobbiamo all'inefficienza delle eliche, che non sono ottimizzate per l'*hovering*, quello che invece chiediamo alle eliche di un multirottore.

I nostri multirotori possono evidentemente essere migliorati, e questo miglioramento sarà nelle eliche.

### Bibliografia

Salvaterra, C., (2011). *La propulsione elettrica*. International Press.

### Sitografia

[http://www.rctigermotor.com/html/2013/Efficiency-Type\\_0928/94.html](http://www.rctigermotor.com/html/2013/Efficiency-Type_0928/94.html)

[http://copter.ardupilot.com/wiki/advanced-multicopter-](http://copter.ardupilot.com/wiki/advanced-multicopter-design/#professional_grade_power_system_for_large_quadcopters_288243_propellers)

[design/#professional\\_grade\\_power\\_system\\_for\\_large\\_quadcopters\\_288243\\_propellers](http://copter.ardupilot.com/wiki/advanced-multicopter-design/#professional_grade_power_system_for_large_quadcopters_288243_propellers)

<http://www.mutiwii.com>

# Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

# Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

# Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

**Coordinamento editoriale e impaginazione**

Centro Editoriale Nazionale | INGV

**Progetto grafico e redazionale**

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2015 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

**<http://www.ingv.it>**



**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia**