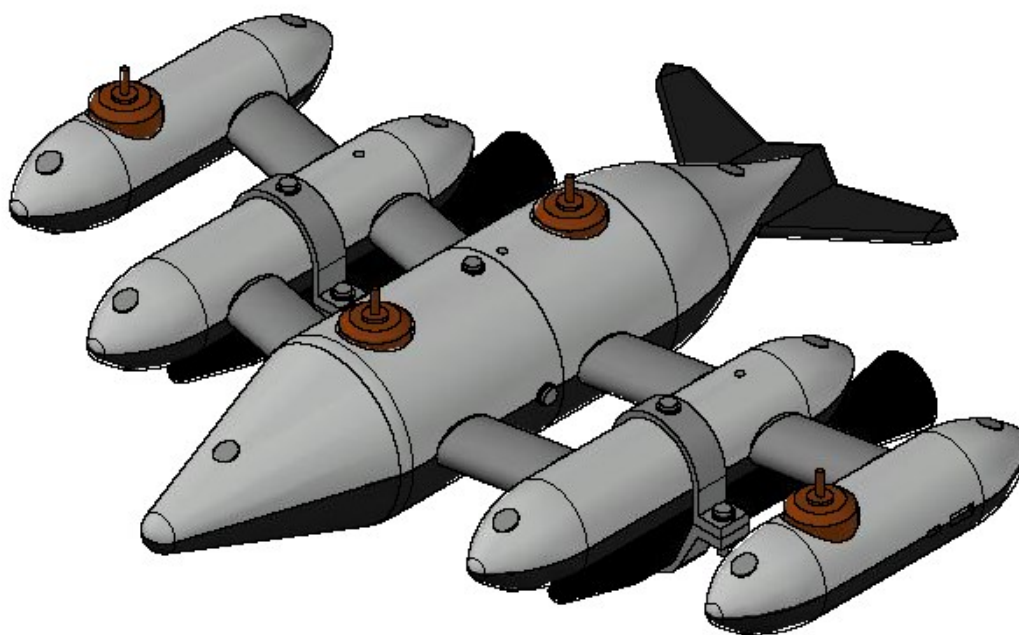


Ikarus-X

Dimostratore tecnologico a propulsione ibrida

di Giovanni Nicola D'Aloisio



23 settembre 2020

Ikarus-X

Dimostratore tecnologico a propulsione ibrida

di *Giovanni Nicola D'Aloisio*

Indice dei contenuti

1. Panoramica del veicolo;
2. Profilo di volo;
3. Telaio;
4. Sistema a propulsione elettrica;
5. Sistema a propulsione chimica *Elektron*;
6. Sistema di navigazione;
 - a. Navigazione radioassistita;
 - b. Navigazione autonoma;
7. Appendice A – Datasheets e circuiti elettronici;
8. Appendice B – Sviluppi futuri;
9. Bibliografia.

Panoramica del veicolo

Ikarus-X (d'ora in avanti indicato solo come **Ikarus**) è un dimostratore tecnologico per un sistema di trasporto spaziale più rapido, economico e sicuro delle soluzioni attuali, fondato sulle propulsioni elettrica e chimica e ispirato dallo *Space Shuttle*. Il primo volo è previsto nel 2022.

Profilo di volo

Ikarus è un *veicolo a liftoff e landing verticale*: all'inizio di ogni volo, una volta inizializzati i sistemi di bordo, vengono avviati con un potenziometro i motori del sistema a propulsione elettrica, le cui eliche lo fanno alzare per il principio di azione e reazione. A questo punto può essere orientato mediante un joystick, in *navigazione radioassistita*.

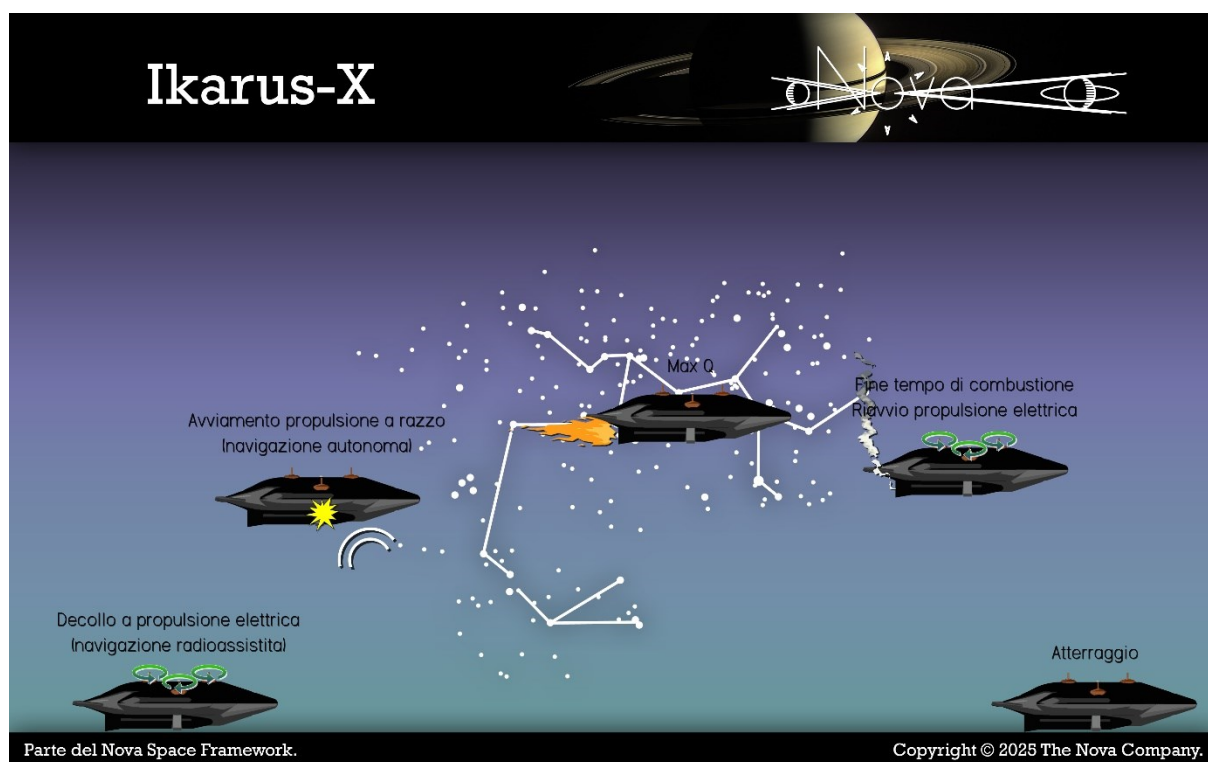


Fig. N° 1 – Le fasi di volo.

In fase di test il veicolo viene manualmente posto a una distanza massima di 175 m dalla trasmittente a terra e viene attivato il pulsante integrato nel joystick, con cui si disattiva la propulsione elettrica e si attiva quella chimica. In questa fase il telaio è soggetto ai massimi sforzi, derivanti dal grande impulso specifico prodotto dagli *Elektron*. Una volta esauritosi il combustibile, il sistema di propulsione elettrica si riattiva per eseguire un atterraggio sicuro e totalmente automatizzato.

La distanza di sicurezza consente di mantenere il collegamento radio tra scheda di bordo e terra, e tre luci al LED di diverso colore (verde, bianco e rosso) montate nella parte superiore, se fisse, indicano il corretto funzionamento degli impianti di bordo o, se a intermittenza, il funzionamento degli *Elektron*.

Telaio

Il telaio è diviso in cinque parti, numerate da 0 a 2 a dritta (*Starboard*) e a sinistra (*Port*): S1 e S2 a destra e P1 e P2 a sinistra. Il segmento centrale è identificato con la sigla S0/P0.

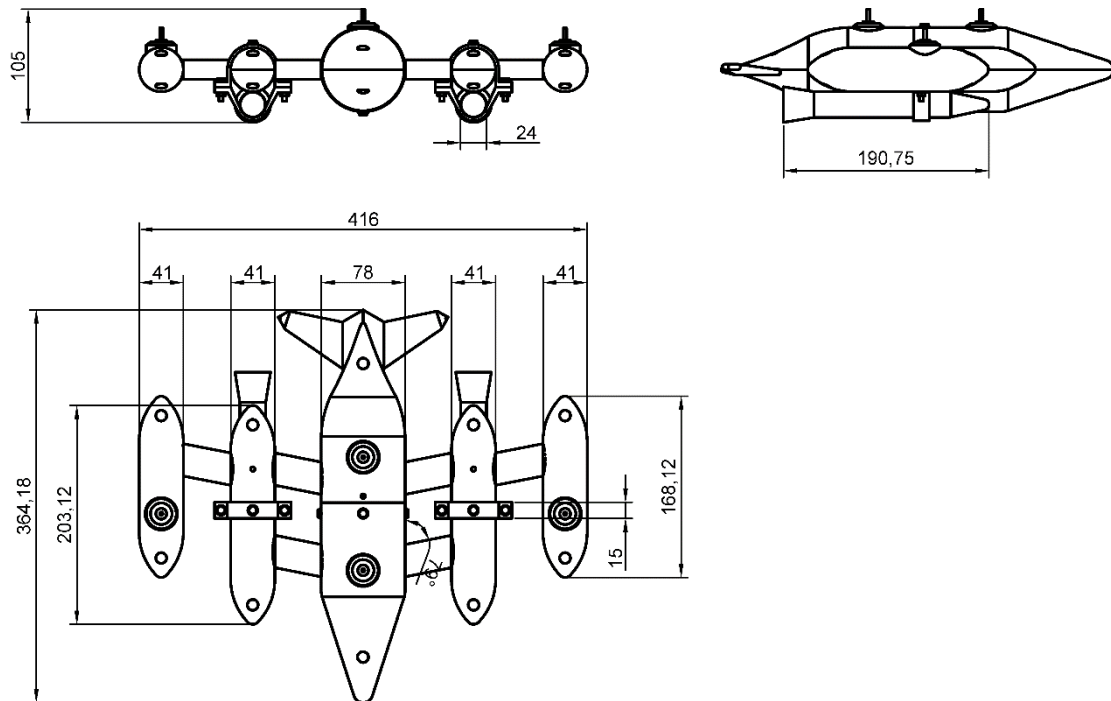


Fig. N° 2 – Dimensioni del telaio.

I settori sono connessi tra loro con 6 bracci a incastro, con i cavi del sistema elettrico al loro interno. L'appoggio a terra avviene senza strutture aggiuntive, e il segmento S0/P0 è dotato di una pinna stabilizzatrice posteriore, oltre a essere diviso in due parti, che si incastrano e fissano tra loro con quattro viti e bulloni. I bracci pesano complessivamente TBD g.

Nella tabella seguente sono riportate le dimensioni fuori tutto del telaio, che a pieno carico pesa TBD g.

Segmento	Lunghezza [cm]	Larghezza [cm]	Altezza [cm]	Massa [g]
S0 = P0	36,4	15,8	9,8 (con la pinna)	TBD
S1 = P1	20,3	4,1	7,4 (con <i>Elektron</i>)	TBD
S2 = P2	16,8	4,1	4,1	TBD

Il piano di carico prevede i motori del sistema di propulsione elettrica negli scompartimenti S2, S0 e P2, il sistema di propulsione chimica sotto e le batterie all'interno degli scompartimenti S1 e P1, dotati di fori che garantiscono, con un dedicato anello di fissaggio, la buona tenuta della spinta, gli *Electronic Speed Controller*, il giroscopio e la ricevente nello scompartimento S0/P0 e il controller, le prese USB di ricarica e manutenzione e i selettori negli scompartimenti S2 e P2.

Il telaio è composto da parti in *acido polilattico* (PLA) lavorato per *Fused Deposition Modeling*. Ciascun segmento è diviso in due parti fissate tra loro alle estremità con l'ausilio di viti e bulloni, i cui fori sono riempiti con appositi coperchi in modo da mantenere basso il C_D e aumentare la solidità della struttura.

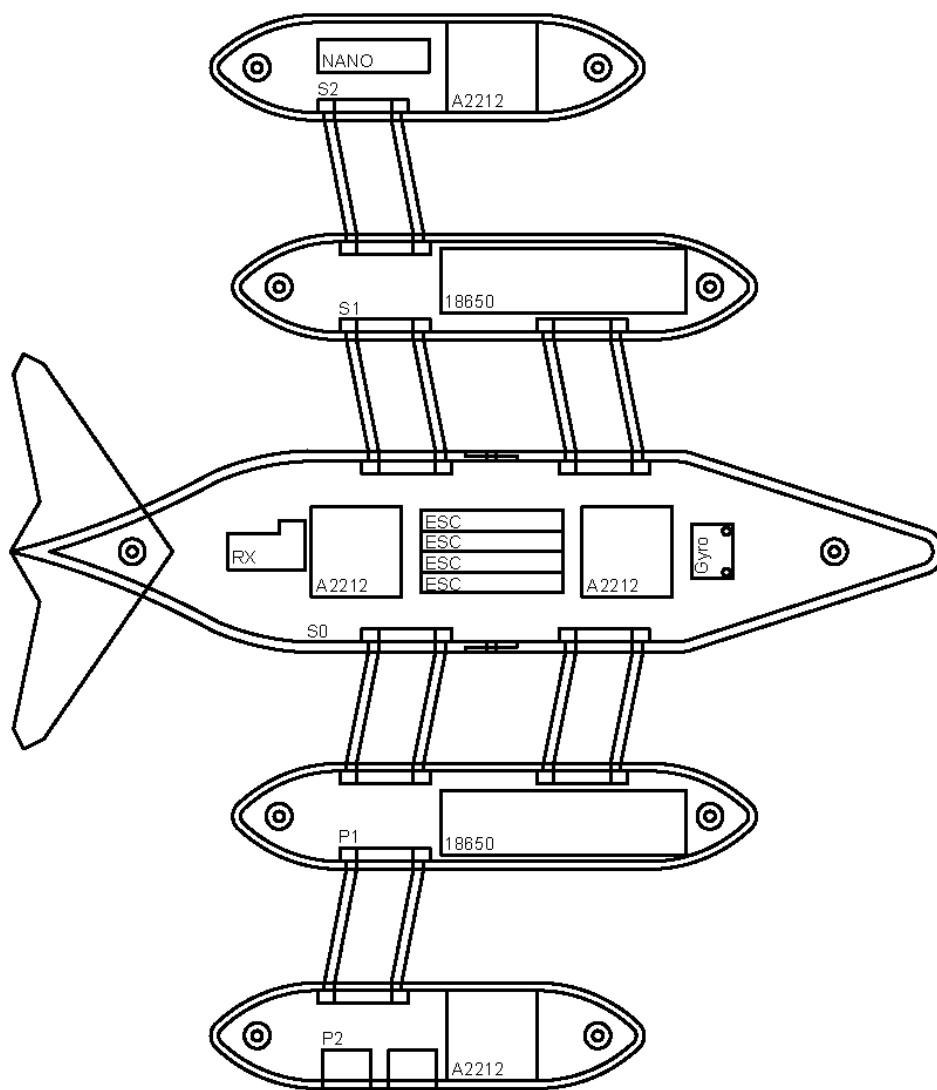


Fig. N° 3 – Piano di carico.

Disposti i pezzi inferiori di ciascun segmento su un piano, si fissano le viti del giroscopio, la ricevente con la relativa antenna, il controller, gli interruttori e le prese USB, i controller elettronici di velocità, le viti dei motori brushless, i LED di segnalazione, le batterie e i cavi elettrici nelle apposite sedi, dopodiché si fissano con viti e bulloni le coperture superiori dei segmenti S2, S0/P0 e P2, una volta appoggiati i bracci.

La copertura superiore dei segmenti S1 e P1 potrà essere fissata in modo analogo solo dopo averla fissata a sua volta alla parte alta di ogni anello, con viti e bulloni dello stesso tipo. A questo punto, per completare il montaggio, basterà inserire la parte bassa dell'anello nell'*Elektron*, e unire le due metà.

Sistema a propulsione elettrica

Il sistema a propulsione elettrica è caratterizzato dalla presenza di quattro motori elettrici comandati dalla scheda ATmega328P attraverso controller di velocità. Tutte le utenze sono alimentate in corrente continua con accumulatori a ioni di litio 18650 (COKE-PWSTICK-26-C).

Nel motore *brushless* in corrente continua, composto da un rotore (libero di ruotare e caratterizzato dalla presenza di un magnete permanente) e uno statore, una centralina fornisce tensione a determinati avvolgimenti dello statore; quando questi vengono polarizzati, in essi circola una corrente elettrica che produce a sua volta un campo magnetico. Per questo motivo lo statore si comporta come un secondo magnete. Alternando l'alimentazione tra le bobine statoriche, si ottiene un campo magnetico rotante.

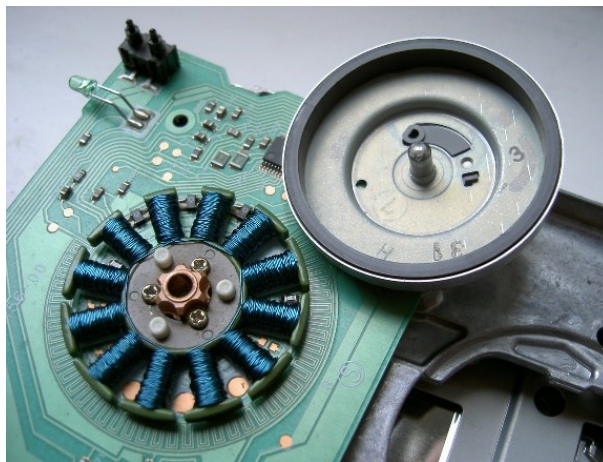


Fig. N° 4 – Motore BLDC di un floppy disk (Wikipedia).

Come due calamite si spostano finché i poli opposti non corrispondono, così i campi magnetici del motore si attraggono, ma dato che quello statorico è fisso, quello rotorico produce potenza meccanica che può essere sfruttata da una ruota gommata, un nastro trasportatore o, in questo caso, un'elica.

I dati dei motori e dei controller di velocità utilizzati sono riportati più avanti. Si ricorda che per loro stesso progetto, gli ESC utilizzati impediscono a qualunque alimentazione l'avviamento istantaneo dei motori, e la risposta ai cambi di potenza è lineare grazie ad appositi filtri RC.

Le pale di un'elica sono porzioni di *elicoide*, la superficie disegnata da una particella che ruota attorno a un asse e contemporaneamente trasla lungo lo stesso asse. Tale moto, in questo caso impresso all'aria, fornisce al veicolo la spinta verso l'alto necessaria per il suo sollevamento da terra.



Fig. N° 5 – Una delle eliche.

Sono previste quattro eliche, disposte a croce greca, a due pale, con diametro di 8 cm ciascuna. I motori da 2700 RPM/V, inoltre, consentono di ottenere un'elevata coppia con la stessa alimentazione di cui necessiterebbero motori da 1000 RPM/V.

Sistema a propulsione chimica *Elektron*

Ikarus può passare una sola volta al sistema a propulsione chimica, basato sull'*Elektron*, motore a razzo a un solo segmento di propellente solido. Lo scambio avviene con un ritardo proporzionale al tempo di risposta del microprocessore ATmega328p del controller di bordo.

La camera di combustione è un cilindro realizzato in PLA, dal volume interno da 46,1 cm³ circa.

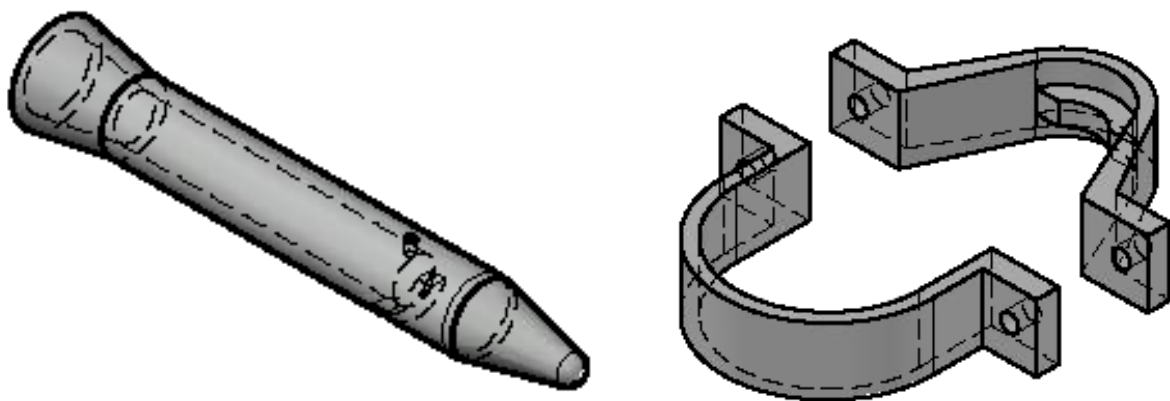
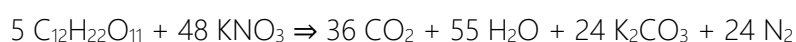


Fig. N° 6 – Vista assonometrica di Elektron v1 e dell'anello di giunzione.

White TNT è il nome dato alla barra di miscela esplosiva "fatta in casa", composta al 36% da propellente saccarosio e al 64% da ossidante nitrato di potassio che reagiscono secondo le equazioni:



Il saccarosio ($\rho=1,59 \text{ g/cm}^3$; $H_i=17 \text{ MJ/kg}$) e il nitrato di potassio ($\rho=2,11 \text{ g/cm}^3$) sono stati scelti per il loro semplice approvvigionamento, e per ogni volo ne sono necessari rispettivamente 26,4 e 35,0 g, producendo complessivamente 370 kJ di energia termica. La preparazione della miscela avviene come segue.

Dopo aver finemente polverizzato il nitrato di potassio, si aggiunge lo zucchero alla miscela, e il tutto viene lentamente agitato a mano per tre minuti circa (la miscela è altamente esplosiva e può facilmente verificarsi un innesco per via elettrostatica). A questo punto la miscela può essere versata nella camera di combustione, già provvista della resistenza di ignizione, dove viene pressata molto lentamente.

Quando Ikarus passa alla navigazione autonoma, il processo di ignizione è automatico, temporizzato e irreversibile. Al passaggio di corrente elettrica la resistenza immersa in fondo alla barra di combustibile produce in pochi millisecondi una grande potenza termica, che completa il triangolo del fuoco scatenando l'incendio della miscela.

Sistema di navigazione

Ikarus opera normalmente in navigazione radioassistita, eccetto in fase di test. Due schede ATmega328P (Arduino compatibili) adeguatamente programmate comunicano tra loro in banda 433,92 MHz a modulazione di ampiezza; di queste, una si trova a terra e l'altra a bordo.

Le eliche sono numerate in senso orario da quella prodiera a quella di sinistra, per esponenti; si avranno quindi p^1 , p^2 , p^3 e p^4 ; quelle di indice pari ruotano in senso antiorario, quelle dispari in senso orario, per compensare la spinta trasversale prodotta dai moti vorticosi dell'aria circostante.

Navigazione radioassistita

Il potenziometro della trasmittente è deputato al controllo della potenza elettrica trasferita dalle batterie ai motori per mezzo degli ESC, ed è unico per tutti i motori.

Il joystick, invece, regola i moti di rollio (attorno all'asse x) e beccheggio (attorno all'asse y). Con una inclinazione, il telaio è soggetto a un momento che lo fa spostare nella direzione nella quale si è "chinato". Per indurre la rotazione attorno a un asse, è sufficiente ridurre o aumentare la potenza di uno dei motori disposti lungo la direzione perpendicolare a quello stesso asse.

Ruotando, per esempio, in avanti il joystick, l'ingresso analogico viene codificato e modulato in ampiezza dalla scheda di comando a terra e trasferito a una frequenza di 433,92 MHz all'antenna di bordo. Il segnale viene decodificato dalla scheda di comando che lo invia ai controller di velocità dei motori (ESC); in base al suo valore verrà fornita una certa tensione e frequenza di rotazione ai motori corrispondenti.

Navigazione autonoma

Il joystick è dotato anche di un pulsante con il quale, in sequenza:

1. Si spegne il sistema di propulsione elettrica;
2. Si avvia un cronometro;
3. Si innesca il sistema di propulsione chimica;
4. Trascorsi i secondi di accensione dei motori, si riattiva il sistema di propulsione elettrica;
5. Si torna alla navigazione radioassistita.

Dopo l'atterraggio è possibile ricaricare gli *Elektron* ed eseguire un nuovo test.

Qualora dovesse mancare l'innesco o terminare in anticipo la fase di spinta, è possibile riattivare il sistema di propulsione elettrica con lo stesso pulsante del joystick. Inoltre, con inclinazione maggiori di 30° il radiocomando viene fermato e Ikarus riduce la potenza dei motori più idonei fino a che il giroscopio di bordo non registra una situazione trasversalmente e longitudinalmente dritta, e il radiocomando viene riattivato.

Appendice A – Datasheets e circuiti elettronici

MOTORI BLDC A2212 2700 KV		ELECTRONIC SPEED CONTROLLERS		
RPM/V	2700	Massa	25 g	
Massa netta	50 g	Dimensioni	45 × 24 × 11 mm	
Massa	60 g	Tensione nominale	5,6 V ÷ 16,8 V (2 - 3 celle LiPo, 5 - 12 celle Ni-MH/Ni-Cd)	
Dimensioni	27 × 27 × 26 mm	Corrente del BEC	2 A	
Dimensioni albero	3,17 mm – 12,0 mm	Corrente nominale	30 A (con picchi di 40 A in meno di 10 secondi)	
Alimentazione ottimale	2 - 3 LiPo (< 8 V)	CONTROLLER ELETTRONICI		
Corrente a riposo	1,8 A		UNO R3	NANO
Corrente nominale	18,5 A	Microcontroller	ATmega328P	
Massimo rendimento	80%	Tensione di funzionamento	5 V	
Corrente ottimale	4 - 10 A	Tensione di alimentazione raccomandata	7÷12 V	
Potenza	240 W	Digital – PWM Digital I/O Pins	14 - 6	22 – PWM
ESC	20 ÷ 30 A	Analog Input Pins	6	8
Correnti di picco	14 ÷ 22 A	DC Current per I/O – 3,3 V Pins	20 mA – 50 mA	40 mA – 50 mA
ELEKTRON v1		Corrente assorbita	19 mA	
Propellente	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ /KNO ₃	Flash Memory	32 kB	32 kB
Rapporto di combustione	25,3	SRAM	2 KB	
Rapporto di scarico	TBD	EEPROM	1 KB	
Spinta (SL)	TBD	Clock	16 MHz	
I _{sp} (SL)	TBD	LED_BUILTIN	13	
Tempo di accensione	TBD	Dimensioni	68,6 × 53,4 mm	18 x 45 mm
Lunghezza	17,9 cm	Massa	25 g	7 g
Diametro	3,3 cm (allo scarico)			
Massa	45 g (a vuoto) – 106 g (carico)			

TRASMITTENTE E RICEVENTE		
	TX	RX
Modello	MX-FS-03V	MX-05V
Raggio di trasmissione	20 ÷ 200 m	//
Tensione di alimentazione	3,5 ÷ 12 V	DC 5 V
Corrente a riposo	//	4 mA
Modalità di trasmissione	AM	//
Frequenza di ritrasmissione	433,92 MHz	
Velocità di trasmissione	4 kbps	//
Potenza di trasmissione	10 mW	//
Sensibilità di ricezione	//	-105 dB
Dimensioni	19 × 19 mm	30 × 14 mm
Antenna esterna	Cavo lineare da 25 cm a uno o più nuclei	Singolo solenoide da 32 cm avvolto a spirale

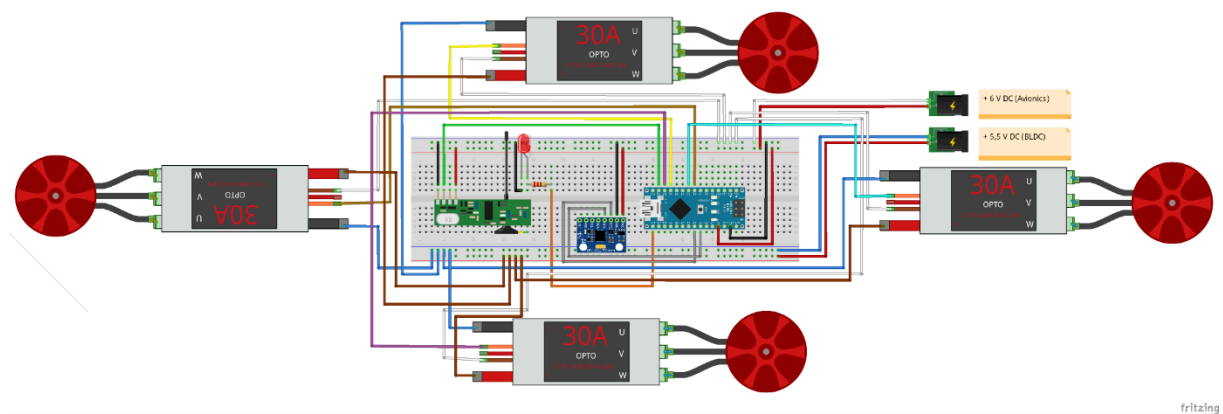
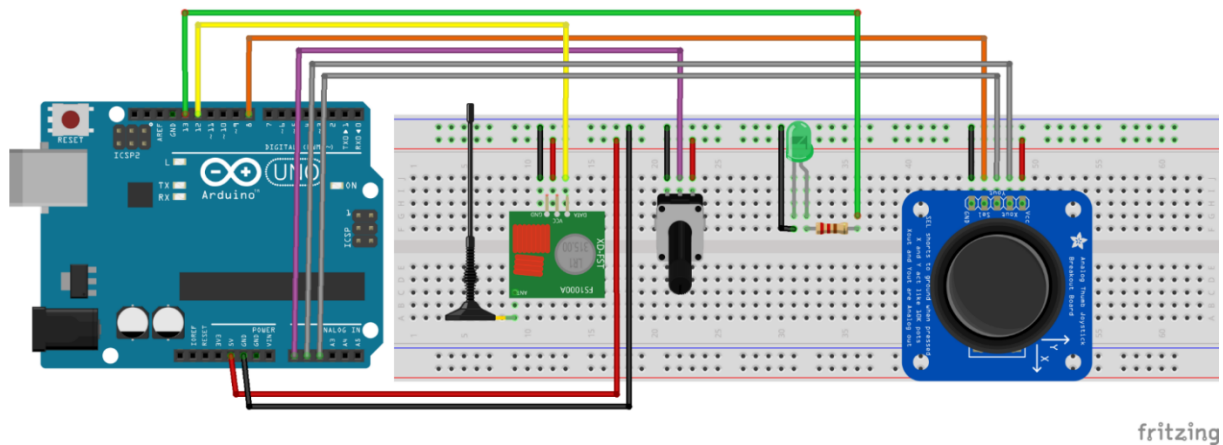


Fig. N° 7 – Schema di principio del circuito di comando a terra (in alto) e a bordo (in basso).

Appendice B – Sviluppi futuri

Lo Space Shuttle era stato inizialmente concepito come mezzo di trasporto per carichi di rilevanza scientifica tra la Terra e la Luna. Ikarus è stato pensato per ampliare questa idea, ma rispetto a ogni altro veicolo vede la prima fase del volo, quella nell'atmosfera di un qualsiasi corpo celeste, eseguita con propulsione elettrica e chimica; i motori elettrici sono i più potenti, affidabili ed efficienti al mondo.

Basandosi sullo stesso sistema di navigazione di Ikarus-X, Ikarus monta due propulsori 3-in-1 identici. Partendo da una struttura *scramjet* lineare di base combinata con quella di un *propfan*, l'aria viene spinta a più di 1,2 Mach verso la sezione di gola, dove avviene la combustione con metano, idrogeno o cherosene; l'efflusso avviene in un *aerospike* lineare, che consente di ottenere il massimo rendimento a tutte le altitudini. Nel caso in cui l'atmosfera non dovesse contenere abbastanza ossigeno o dovesse esserne priva, la sezione di compressione viene isolata per sfruttare l'aria stoccata a bordo. Raggiunto lo spazio, ogni manovra viene eseguita con un propulsore ionico ad aria a effetto Hall, posto sulla corona dello *scramjet* e alimentato con i pannelli solari rivestiti in alluminio trasparente che ricoprono il telaio in caso di volo interplanetario, o con il reattore a fusione nucleare di bordo in caso di volo interstellare.

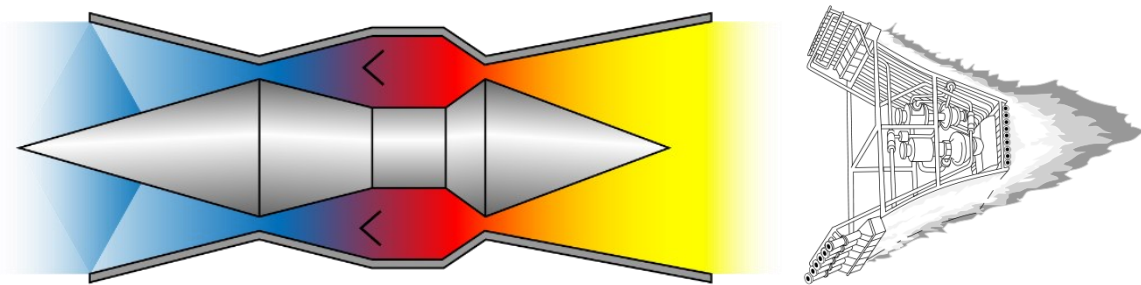


Fig. N° 8 – A sinistra, schema di principio di un ramjet (Wikipedia); a destra, motore aerospike (NASA).

I segmenti S1, P1, S2 e P2 di Ikarus possono contenere stive di carico modulari dal volume utile da 6 a 12 volte quello di uno Space Shuttle; inoltre, con le competenze acquisite durante lo sviluppo e l'utilizzo dello *Spacelab* e dei *Multi-Purpose Logistic Module* (MPLM), i moduli cargo possono essere sostituiti per ampliare la capacità di trasporto persone e sostenere voli di lunga durata nonché contratti di trasporto commerciale interplanetario, necessari per la crescita del turismo spaziale, la colonizzazione del Sistema solare, l'esplorazione di nuovi sistemi stellari, in particolare quello di Alpha Centauri, e il progresso tecnico e scientifico. Infine, i cinque moduli sono connessi tra loro mediante sei tunnel che alloggiano i cavi elettrici e i corridoi pressurizzati per il transito del personale e dei passeggeri. Alcune di queste innovazioni saranno testate già nella prossima versione, Ikarus-Y, attesa per la seconda metà del 2021.

Bibliografia

- A. Marchini – Elementi di macchine idrauliche e termiche – Zanichelli Bologna (1971);
- L. Calligaris, S. Fava, C. Tomasello – Manuale di meccanica – Ulrico Hoepli Editore (2006);
- J. Babicz – Wärtsilä Encyclopedia of Ship Technology (2015);
- R. Ballard – Launch Vehicle Propulsion & Systems – NASA/MSFC (2018).