

1. MOTIVAȚIE ȘI DECLARAȚIA PROBLEMEI

La finalul clasei a 11-a, mă uitam pe YouTube la video-uri despre drone FPV atunci când am dat peste un video al lui Red Bull, intitulat World's Fastest Drone Vs F1 Car. În scurtul documentar, se vorbește despre cum Dutch Drone Gods au prins peste 300 de kilometri pe oră cu o dronă complet custom. Reușita lor mi s-a părut fascinantă și, mai mult decât să mă impresioneze, mi-a dat răspunsul la o dorință pe care eu o aveam din copilărie: să construiesc un aerovehicul de mare viteză, la fel ca Lockheed SR-71 Blackbird, avionul meu preferat.

Așa am început să construiesc o dronă de mare viteză cu scopul de a atinge 300 km/h, fără vreun pic de experiență cu drone FPV. Fast and Furious !

2. PROIECTARE ÎNIȚIALĂ ȘI ALEGERI STRATEGICE

În primul rând, a trebuit să fac o listă de componente. Având în vedere că bugetul era de acasă, a fost important pentru mine să o pot construi singur fără să utilizez piese scumpe și să mă pot baza doar pe imprimanta mea 3D Bambu Lab. Am ales să merg pe platforma cu elice de diametru de 5 inci și baterii 6s, pentru că este cea mai frecvent folosită de piloții de drone de cursă (cele mai rapide drone posibile) și oferă o varietate mare de piese și un design de tip bullet (glonț) quadrirotor.

2.1 Componente esențiale ale unei drone:

- Motoare + elice: fac drona să zboare
- ESC (controler electronic de viteză): controlerul pentru viteza motoarelor, el alimentează/comandă motoarele în funcție de ceea ce primește ca și comenzi de la Controler de zbor
- Controlerul de zbor: creierul dronei
- Receptor radio: citește semnalele de la telecomandă și le transmite „creierului”
- GPS: pentru măsurarea vitezei și a coordonatelor geografice - transmite creierului de asemenea
- Baterie
- Telecomandă - controler

Dronele FPV (vedere din perspectiva pilotului) conțin un sistem video prin care pilotul poate vedea în timp real activitatea dronei. Astfel, manevrarea devine mult mai ușoară și poate fi executată și atunci când drona nu se află în câmpul vizual.

Pentru partea de FPV, lucrurile pot fi un pic mai costisitoare, trebuie să alegi:

- Casca video care conține VRX (receptor video) – receptorul din ochelari/stație de sol, în care vei vedea:
 - Imaginile din drona în timp real;

- Telemetrie - informații în timp real despre parametrii de zbor
- Așa numitul „unitate aeriană” care conține:
 - **Cameră – FPV camera** → **senzorul care captează imaginea.**
 - **VTX (emițător video) – emițătorul video** → **transmite imaginea către ochelari/stația de la sol.**
 - **VPU / procesor video – procesorul video, dacă sistemul are unul separat, procesează/comprimă imaginea de la cameră înainte de transmisie.**

2.2 Alegerea componentelor

Drona de viteză a mers pe un ansamblu electronic de tip FPV, e mai ușor de pilotat iar la viteza pe care o doream ar fi ieșit destul de rapid din câmpul vizual.

SISTEM VIDEO

Astfel, pentru transmisia video, am mers pe combinația DJI O4 unitate aeriană Pro, unul dintre cele mai bune echipamente video cu rază de transmisie mare, și DJI Goggles N3, ochelari perfecți pentru începători, cu recepție de semnal foarte bună.

Aceste alegeri nu sunt neapărat cele mai bune (pot fi alese și alte platforme video mai bune sau mai ieftine). Eu le recomand deoarece s-au descurcat bine în configurația meu și mi-a convenit faptul că mergeam la sigur luându-le de la același producător. La ce trebuie să te uiți, în principiu, este raza de acțiune radio legată de rezoluție și, nu în ultimul rând, prețul.

Urmează partea puțin mai complicată, și anume alegerea motoarelor.

MOTOARE

Aici trebuie puțin să vă explic ce și cum se codifică tipurile de motoare. Ca exemplu, toate motoarele au un indicativ de genul „xyzw KV”. Ce înseamnă asta? XYZW este un număr care indică câte rotații pe minut (RPM) execută acel motor la fiecare volt de tensiune primit de la baterie (prin ESC). Ca și exemplu:

- Dacă ai un motor cu 1000 KV atunci:
- Îl legi la o baterie de 10 volți;
- El se va roti cu 10×1000 adică 10.000 RPM!

Frumos, nu? Dar nu este totul.

Ai zice că iei un motor care se învâрте cât mai rapid, dar... cu cât e mai rapid, cu atât are forța mai mică! Imaginează-ți un motor care merge încet, dar trage casă după el (tractor) sau un motor ultra-rapid pe care îl oprești cu degetele; cam asta e diferența.

Pentru a nu face lucrurile foarte complicate, o să mă întorc acum la altceva, elicea, apoi revenim la motoare.

ELICE

Deci elicea ce are? Două chestii: diametru, număr de pale și pas. Cred că diametrul e cam clar ce este nu? Ok, hai să vedem numărul de pale... evident și asta nu? 2, 3, 4 și așa mai departe sunt vizibile și clare. Dar pasul e clar? Se vede și el cu ochiul liber și cât de torsionată e pala elicei, ceea ce are ca efect cât de „mult” se înșurubează în aer. Ca pasul de la un șurub.

Ce efect are pasul? Păi când elicea se rotește complet odată, cât avansează prin aer. Dacă e ceva neclar gândește-te la șurub și piulița, la o rotație una fata de cealaltă avansează cu distanța dintre spire = pasul. Clara nu?

Păi și ce treabă am cu pasul elicei? Simplu spus, o elice cu pas mare, o învârti mai greu (se opune nu?) dar poți să ajungi la o viteză mai mare (dacă ai forță să o învârti), deci e un balans aici. Din acest balans nu ieși decât cu ceva matematica (calculezi ca să știi ce e mai bine pentru proiectul tău) sau cu ceva teste și/sau experiența împărtășită de la ceilalți. Ca idee, poți lua un motor cu KV mare (are turație mare) și să încerci cu mai multe tipuri de elice (sunt ieftine 3-4 EUR setul) pentru a vedea ce merge cel mai bine la tine.

În final încă o chestie despre elice:

- pale mai puține (două adică) = viteză;
- pale mai multe = tracțiune;

Rațiunea e cumva simplă, mai multe pale trag, mai mare forță pe care o ai și totul e ok până când totul o ia razna dacă viteza de rotație e așa de mare, încât palele se afectează una pe cealaltă. What? Da... fiecare pala lasă o „dara” invizibilă de aer agitat/turbulent în urma ei iar la viteze foarte mari, fiecare pala prinde din urma dăra celei din fata ei... Astfel aerul fiind turbulent elicea nu mai merge bine = nu mai trage. Deci viteze foarte mari (de rotație RPM da?) = două pale. Să mai zic că la viteze foarte mari de rotație elicea poate să ajungă în regim transonic și sau supersonic? Nu mai zic că devine complicat

Acum poate faceți o legătură între cum ne gândim la elice și motor. Vrem viteză sau forță căci ambele e mai greu... În mare vrei viteză? Atunci KV mare și elice cu pas mare cu două pale. Vrei forță? Motoare cu KV mai mic (dar cuplu/forță mare) elice cu pas mare și trei pale. Patru?

Eu am vrut dragster. Viteza maximă în câteva secunde. Cam asta a stat în spate ca idee de design și atunci,

ÎNAPOI LA MOTOARE

Pe zona de propulsie a dronei, am ales motoarele T-Motor F60 PRO V 1950 KV, motoare de calitate înaltă și cuplu relativ ridicat, perfecte pentru sarcină înaltă la viteze mari.

Acum vine altă poveste. Ai ales motoarele, bun, trebuie să alegi electronica ce poate să le ducă.

ELECTRONICĂ

Va mai amintiți nu? Avem ESC-ul care comandă motoarele (ca un potențiometrul care le da mai tare sau mai încet pe fiecare în parte) iar el primește comenzi de la FC (Controler de zbor) = creierul.

Către ceva despre fiecare acum, începem cu ESC-ul.

Parametrul principal în evaluarea ESC-ului este curentul maxim suportat, adică când motoarele merg la maxim. E interesant de spus că maxim nu înseamnă neapărat viteză maximă, ci și atunci când drona accelerează... la putere maximă. În concluzie trebuie să vă uitați în fișa tehnică a motoarelor și să vedeți ce curent suportă. Maxim.

Acest curent îl luați în calcul când dimensionați ESC-ul. Ca idee la motoarele alese de mine, pentru T-Motor F60 PRO V 1950 KV (varianta standard), T-Motor specifică:

- **Curent de vârf: 49,3 A**
- **Tensiune de test: 25,2 V (6S)**

- **Putere maximă: 1.216 W**
- **RPM la 100% accelerație: 31.401 RPM cu elicea T5147-3**

Deci avem Peak curent, ESC-ul ar trebui să îl suport susținut (zeci de secunde) fără să pătească ceva. De unde și alegerea mea, am folosit aceste motoare cu combinația Argus PRO 55A/F7 stack, care oferă un ESC de 55A și un radiator (e îmbrăcat în aluminiu cu proprietăți radiante de răcire) pentru răcire mai eficientă în timpul zborului, care va reuși să reziste la sarcina înaltă cerută de motoare. În pachet (se cumpără împreună) vine și T-Motor F7 FPV Controller de zbor echipat cu Betaflight, care va oferi o experiență de tip Plug-and-play. Betaflight, pentru cei care iau prima dată contact cu dronele, este firmware-ul (software-ul) open-source care rulează pe controller de zbor-ul (FC) unei drone FPV. Practic, este software-ul din „creierul” dronei care citește senzorii, primește comenzile pilotului și comandă ESC-urile/motoarele pentru a menține și controla atitudinea dronei. Simplu. Mai în detaliu ce face Betaflight:

- **Stabilizare** – folosește giroscopul și accelerometrul pentru a determina mișcarea dronei.
- **Control PID** – calculează continuu corecțiile necesare pentru roll, pitch și yaw.
- **Amestecarea comenzilor pentru motoare** – transformă comenzile de roll/pitch/yaw/accelerație în comenzi individuale pentru cele 4 motoare.
- **Filtrare** – elimină vibrațiile și zgomotul provenit de la motoare, elice și cadru.
- **Control ESC** – transmite comenzile către ESC-uri prin protocoale precum DShot.
- **Failsafe** – poate opri motoarele sau aplica o configurație prestabilită dacă se pierde semnalul radio.
- **OSD** – poate suprapune pe imagine date precum tensiunea bateriei, curentul, RSSI, temperatura, timpul de zbor etc.
- **Înregistrarea Blackbox** – poate înregistra datele de zbor pentru analiză ulterioară și reglarea PID/filtrare.

Cam multe nu? Dar pe scurt, FC-ul rulează Betaflight iar combinația Hardware din componenta FC-ului cu software-ul rulat Betaflight, realizează în final funcțiile de mai sus.

Acum atingem altă chestie sensibilă și anume modurile de pilotaj ale unei drone FPV.

Ziceați ca e simplu dar, nu e nici complicat... dar e bine să știți la ce să vă așteptați. Deci modurile de pilotaj ale unei drone FPV, sunt în principal 3:

1. **Modul Angle** – drona se auto-nivelează. Când eliberezi stick-ul, revine spre poziția orizontală. Bun pentru începători, asta au toate dronele comerciale și le pilotează oricine.
2. **Modul Horizon** – combină auto-nivelarea cu posibilitatea de a face flip-uri/roll-uri la capătul cursei stick-ului. Aici dacă vrei să mergi către zona de acrobație, merita să studiezi clar ideea.
3. **Modul Acro / Rate** – fără auto-nivelare. Asta cam PRO mode și este ceea ce eu voiam. Stick-ul comandă rata de rotație, iar drona cade ca piatra dacă nu o ții din accelerație. Acesta este modul folosit în mod obișnuit pentru FPV racing și freestyle. E cel mai puternic mod, ai control total pe drona dar trebuie să știi ce faci. Eu nu am avut timp să învăț și am apelat la un pilot profesionist (PRO mode cum ziceam), pentru ca să pilotezi la 300+ km/h nu trebuie să faci multe greșeli ca să distrugi drona. Și în final foarte bine am făcut, fiecare cu știința lui cumva.

BATERIE

Fiindcă powertrain-ul ales (ansamblul motoare elice, ESC) a fost fi extrem de puternic și va necesita curenți electrici foarte înalți (38–45 de amperi per motor !!!), a fost nevoie de o baterie cu capacități de descărcare foarte rapide.

Acum ce înseamnă descărcare rapidă? Păi hai să zicem așa, ai un rezervor mare cu apa = bateria. Cat de mare? Păi e așa de mare ca poate să dea 10 litri pe minut o ora întreaga, adică tine ați zice vreo exact 600 de litri! Bine bravos dar la baterii se da în „xyzu mAh”, adică bateria tine „xyzy mili amperi consum o

ora”. Bun și mai departe? Păi ne întoarcem la rezervor și ne gândim dacă eu vreau să îl golesc mai repede ca am un incendiu să zicem, pot să scot doar 10 litri pe minut? E puțin pentru foc, as avea nevoie de 100 de litri pe minut, ok o să tina doar 6 minute ca are tot 600 de litri dar pot? Pot dacă e prevăzut cu o țeava groasa! Cam așa și la baterii, trebuie să aveți în vedere ce capacitate maximă de descărcare are bateria, ce curent maxim suporta, pentru că de asta ai nevoie să suporti sarcina maximă a motoarelor în accelerație. Cum citim ce știe bateria, pai uite imediat mai jos.

Eu am patru motoare și 45 amperi (minim?) pe fiecare, rezulta un total de circa 170-200 A, și am ales bateria Tattu R-Line V5 Li-Po, 1550 mAh, descărcare maximă de 150C, o baterie ce poate susține aceste eforturi fără un risc de cedare în timpul zborului. De unde știu că suporta?

Pentru **că definiția ratingului C, calculul este exact așa:**

$I_{rated} = C \times Capacity$

Pentru bateria de **1550 mAh = 1,55 Ah:**

$150C \times 1,55Ah = 232,5A$

Astfel ratingul 150C pe bateria aleasă corespunde teoretic la 232,5 A deci acoperitor.

Adică în final bateria trebuie să aibă o capacitate în primul rând în a îți livra curentul necesar, apoi capacitatea pentru cât vrei să zbori. Pe mine nu mă prea interesează capacitatea pentru că voiam viteza i cel mai scurt timp nu autonomie. Pentru autonomie trebuie să estimezi consumul dronei în zbor și apoi să-l raportezi la capacitatea bateriei pentru a determina timpul de zbor (pana se descarcă la un anumit procent).

Alegerea **RadioMaster Boxer ELRS 2.4GHz** împreună cu receptorul **RP3 V2 Nano** reprezintă o configurație de top din ecosistemul ExpressLRS (ELRS), oferind latență minimă, rezistență la interferențe și rază mare de acțiune.

CONTROLLER SI RECEIVER

RadioMaster Boxer (Transmițătorul)

- Putere internă de emisie: Modulul ELRS intern poate emite până la 1000 mW (1W), fiind echipat cu un ventilator de răcire activă integrat pentru a susține această putere fără supraincălzire.
- Gimbal-uri: Senzori Hall V4.0 de dimensiune completă (full-size), oferind precizie ridicată pe stick-uri și durabilitate îndelungată fără frecare pe potențiometre mecanic uzabile.
- Sistem și ergonomie: Rulează nativ EdgeTX, are un factor de formă compact (între TX12 și TX16S), antenă T-Antenna detașabilă și opțiuni flexibile de alimentare (tray pentru 2x 18650 sau acumulatori mari 2S LiPo) cu încărcare rapidă USB-C.

RadioMaster RP3 V2 Nano (Receptorul)

- True Diversity (Diversitate reală): Are două circuite radio complete (2 cipuri RF + 2 antene). Spre deosebire de receptoarele simple cu o singură antenă sau cu comutare pasivă, RP3 V2 procesează simultan semnalul pe ambele canale și alege permanent pachetul cel mai curat.
- Oscilator TCXO (Specificație cheie V2): Varianta V2 include un cristal TCXO (Temperature Compensated Crystal Oscillator). Acesta elimină deviația de frecvență (frequency drift) provocată de variațiile extreme de temperatură — un aspect critic când receptorul este montat aproape de motoare, ESC sau surse mari de căldură.

- Telemetrie amplificată: Cipurile PA/LNA integrate permit o putere de emisie a telemetriei de până la 100 mW, asigurând primirea datelor de navigație (coordonate GPS, tensiune baterie, starea legăturii LQ/RSSI) chiar și la distanțe mari.
- Masă redusă: Are o greutate de doar ~2.2 g (fără antene), fiind ideal pentru build-uri unde fiecare gram și fiecare milimetru de spațiu contează.

GPS

Modulul Beitian BE-220 este unul dintre cele mai populare și eficiente receptoare GPS/GNSS folosite pe dronele FPV moderne.

Acesta are arhitectură u-blox M10 (Generație nouă): Proceasează simultan până la 4 sisteme de sateliți (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou). Aceasta permite o conectare mult mai rapidă și un număr masiv de sateliți blocați (*lock*) în paralel (frecvent 18–30 sateliți în spațiu deschis).

Formă și Greutate Redusă: Are dimensiuni compacte (22 × 20 × 6 mm) și o greutate de doar ~5.3 g, fiind ideal pentru montare pe plăcuța superioară (*top plate*) sau suporturi TPU printate 3D.

Fără Magnetometru (Fără Compas): Spre deosebire de modele precum BE-880, BE-220 nu are compas integrat. Ar putea părea o problemă dar pentru Betaflight și sistemul GPS Rescue, neavând compas este un avantaj (compasul intern este greu de calibrat și extrem de sensibil la interferențele electromagnetice provocate de motoare/ESC). Betaflight determină direcția din mișcare (orientare dinamică GPS).

CADRU ȘI FUSELAJ

Majoritatea dronelor FPV sunt construite pe un cadru de carbon. Acesta le oferă rigiditatea necesară brațelor ce susțin motoarele pentru manevre elaborate în aer, fără a obține torsionări sau vibrații.

Cu alte cuvinte dacă va gândiți la o dronă care să furnizeze performanța, trebuie să luați în calcul aceste aspecte care țin de:

- Forma fuzelaj - dacă are...
- Rigiditatea fuzelajului;
- Greutatea dronei (o bună parte vine din fuzelaj);
- Amplasarea greutatei - centrul de greutate;
- Aerodinamica în general în funcție de scop;
- Complexitatea dronei în general

Pentru drona mea, am încercat să evit un astfel de cadru prefabricat fiindcă adaugă greutate în plus și afectează arhitectura internă a electronicelor. În plus, manufacturarea de piese de carbon este scumpă și lentă. Scopul acestui proiect este construcția unei drone de mare viteză, ce poate fi manufacturată rapid și reparată ușor.

Fiindcă îmi doresc să iterez rapid și să pot să repar drona rapid, am decis că, în afară de electronice, restul dronei va fi făcut numai din resurse accesibile local, precum materiale de la magazine de bricolaj și piese printate 3D pe imprimanta mea.

3. V1: PROTOTIP, DESIGN, CONSTRUCȚIE ȘI TESTARE INIȚIALĂ

În capitolul de față o să vedeți modul în care am gândit și proiectat drona. Trebuie avut în vedere că pentru a face acest pas sunt necesare cunoștințe de CAD, ceea ce va da libertatea absolută în a proiecta drona de la cap la coadă.

Proiectarea are mai multe faze din care as zice că două dintre ele trebuie împăcate:

- Designul interior al electronicelor, camerei și bateriei;
- Designul exterior aerodinamic;

Acestea trebuie să intre și în calculul centrului de greutate precum și a modului în care asamblați apoi drona și ai acces la baterie cel puțin. Apropo, ai nevoie de acces permanent ușor la:

- Baterie - încărcare, conectare/deconectare = pornire/oprire drona;
- FC pentru conectare USB - programare, interogare, telemetrie etc.
- Air unit dacă vrei să înregistrezi video on board (Micro SD card)

Așa ca să faci designul în CAD e super dar trebuie să muncești puțin înainte. Eu am lucrat în Fusion 360 care mi s-a părut ok pentru proiectare și imprimare. Având în vedere că scopul dronei a fost viteza ea a trebuit să fie complet închisă pentru aerodinamica, dar dacă nu vrei asta lucrurile pot fi mai simple apropo de carcasă și fuzelaj.

Dacă într-adevăr te preocupă partea de zbor efectiv și vrei optimizări atunci e necesar un program în care să simulezi partea aerodinamică și să alegi designul optim pentru tine. Aici eu am lucrat cu SolidWorks pentru partea de CFD (Computational Fluid Dynamics). Nu o să intru în detalii dar aici e partea mai complicată și matematica zborului din punctul de vedere al interacțiunii dronei cu aerul. Am mai jos un capitol special pentru asta iar pentru e clar o cale de explorat.

3.1 Proiectare și construcție

Versiunea unu a dronei am gândit-o efectiv în forma unui glonț (bullet) alcătuită din 3 bucăți principale:

- Main Body-ul (partea neagră), pe care vor fi montate toate electronicele,
- Capacul posterior, care închide compartimentul pentru baterie,
- Capacul superior, care are o formă aerodinamică, similară cu cea a unui glonț, și acoperă restul componentelor.

Cele două capace au fost gândite să se înșurubeze pentru demontare rapidă și acces în interior.

MATERIALE

La prima versiune a dronei, main body-ul a fost făcut din PETG-CF, iar capacele din PETG normal. Pentru cei care iau contact prima data cu materialele folosite în imprimarea 3D câteva detalii suplimentare cred că sunt utile. Materialele sunt mai dure sau mai flexibile, mai casante și mai elastice. Eu am împartit lucrurile așa:

- Main body trebuie să fie rigid, să nu flexeze dar să nu fie casant;
- Capacele trebuie să reziste la presiunea aerodinamică (mai ales cel superior) și să fie cât mai ușoare, ele nu au rol decât aerodinamic.

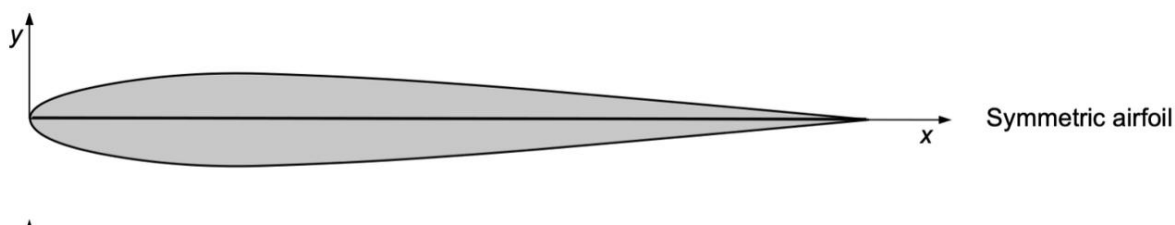
Pentru mine concluzia a fost clară, trebuie să analizez materialele din punctul de vedere al greutatei și rigidității și atunci au rezultat: materialele Carbon Reinforced CF (rigide) sau cele Aero (ușoare). Din nou trebuie să alegi căci ceva care să la aibă pe toate nu există.

Pentru primul prototip am folosit PETG, varianta CF pentru body și normal pentru capace.

BRATE MOTOARE

Brațele dronei au fost construite după profilul NACA 0030, iar monturile pentru motoare au fost prelungite, cu o formă custom de picătură, pentru eficiență aerodinamică îmbunătățită.

Care e treabă cu profilele NACA? Păi se referă la profilul de tip aripă pentru a eficientiza la maxim interacțiunea cu aerul la viteze mari. Orice aripă are un profil tipic iar profilele diferă în funcție de cât de lungi relativ la cât de groase sunt, găsiți multe informații despre NACA pe tot felul de site-uri. Eu o să vă spun mai jos cum am ajuns la acest profil în studiul CFD. Ca idee, brațele trebuie să fie cât mai subțiri dar să încapă prin ele firele pentru alimentarea motoarelor. Trebuie lăsat un canal suficient de larg prin care să poți trage cele trei fire de alimentare ulterior, altfel te alegi cu o problemă. Profilul utilizat este unul simetric care trebuie să fie adaptat lungimii dronei tale și cel puțin, grosimii cablurilor ce trec prin aripă. Un model generic ar fi:

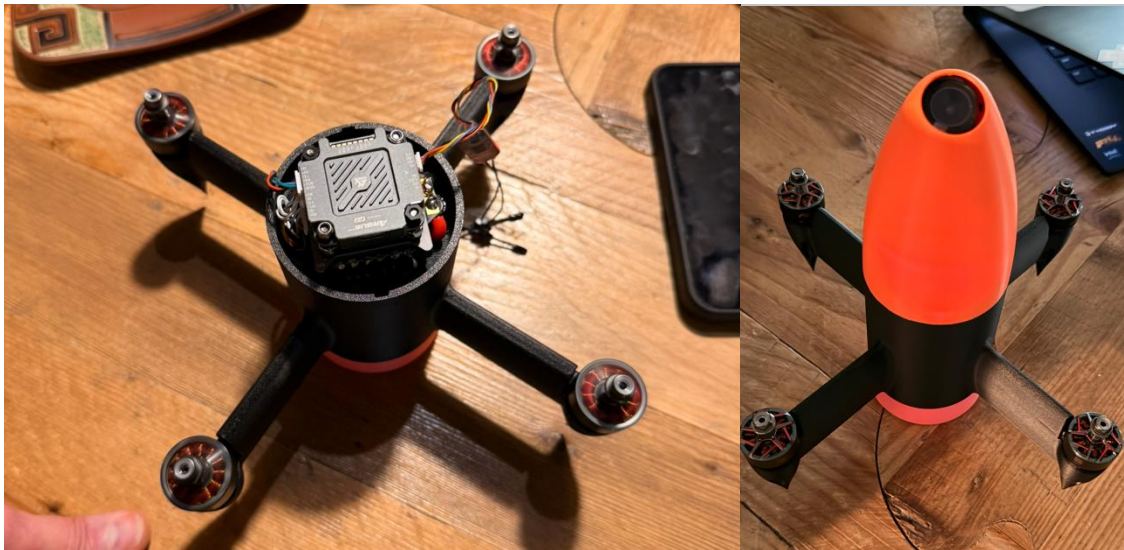


Din punct de vedere arhitectural, în partea inferioară a dronei se află bateria, iar în zona de sus, acoperită de capacul dronei, se află restul componentelor de zbor.

Pe spatele capacului superior, am adăugat un grilaj după ce am terminat configurația dronei, deoarece air unit-ul se supraîncălzea.

3.2 Prototip V1

Cam așa arata prima versiune:



Mai jos sunt imaginile generate de Fusion 360, programul în care am făcut proiectarea 3D:



Designul a păstrat principiile conform cărora totul este construit PE main body (partea centrala rezistentă), atât la nivel interior unde sunt amplasate electronicele, cât și asamblarea exterioara a fuzelajului prin capacul inferior și superior.

Am printat și elemente interne care au permis montarea camerei video așa cum se vede în poza de sus din mijloc.

Elicele folosite au fost două variante cu 3 pale și cu două pale. Varianta cu 3 pale Azure Power SFP 5150 cu pas de 5 inch. Cele cu două pale au fost varianta de 5 inch cu pas de 5 inch Gemfan 5152R. Deși pe site-ul producătorului sunt indicate cu pas de 4 inch (!!!), ele au pas de peste 5 inch și am descoperit asta făcând ceva calcule matematice. E bine de știut căci altfel te poate surprinde drona cât de bine merge și când colo...

3.3 Performanță

După primul test, am atins o viteză de 187 km/h, dar într-un mod destul de greu de controlat. Detalii despre test:

- Nu am folosit telemetria căci la acel moment nu știam cum;
- Viteza maximă a fost indicată în overlay în ochelari (posibil pe telemetrie să fi fost puțin mai mare);
- Am testat cu elicele cu pas similar (5 inch) cu trei și două pale;
- Viteza obținută cu trei pale a fost în jurul a 165Km/h;
- Vitezele au fost citite pe overlay în ochelari, posibil în realitate să fi fost puțin mai mari.

Complet echipata, drona avea 780 grame (configurația cu motoare 1950 KV). Nu știam dacă e mult sau puțin dar vreo 250 de grame vin doar de la baterie.

În zborurile de test practic am validat faptul că vitezele maxime sunt obținute cu două pale la același pas.



3.4 Probleme identificate

Termica

O4 unitate aeriană-ul de la DJI este dependent de airflow și nu funcționează bine în spații închise (după 2 minute de zbor, se supraîncălzește). Pentru V2, trebuie gândite niște guri de aerisire pentru a-l menține la temperaturi de operare optime sau să alterăm configurația la o rezoluție mai mică.



Structurală

Cadrul are un punct de slăbiciune fix deasupra aripii. Pentru V1, asta a însemnat o fisură în cadru în timpul testelor. Trebuie regândit cadrul sau folosit un material mai rezistent.

Materialul PETG-CF pentru structura centrală a dronei este prea moale și provoacă vibrații la nivelul întregii drone ce afectează citirile și calculele controler de zbor-ului. Totodată, pilotul a sesizat asta și ne-a transmis faptul că drona era instabilă, indicând prezența unor vibrații.

Găurile pentru șuruburi erau prea scurte și astfel șuruburile atingeau bobinele și provocau descărcări electrice și perturbații în funcționarea motoarelor. Aveți mare grijă la asta, noi am investigat-o doar după ce am văzut că ies scântei din unul din motoare (!!!) iar în final am avut noroc că nu s-a defectat. Pentru V2, trebuie îngroșate monturile.

Aerodinamică

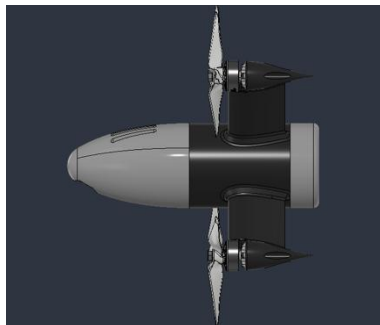
Spațiul dintre aripa/brațul dronei și elice este prea mic. Aripa nu ajungea la eficiență maximă datorită turbulențelor excesive provocate de proximitatea față de aripă (airflow-ul ricoșează înapoi și încetinește elicea, provocând oscilații ce influențează controlul dronei). Pentru eficiență maximă, elicea trebuie să fie la 12–15 mm peste braț. În V1, elicea era deasupra numai cu 7 mm.



Între motoare și cadru există un spațiu mort care trebuie acoperit pentru a minimiza dragul. La versiunea ulterioară am decis să îl acopăr cu un guler proiectat pe șasiu (main body).

Elicele cu 3 pale nu sunt bune pentru viteză mare cum spuneam din testele efectuate. Palele elicei ajung să funcționeze una în „wake-ul” provocat de celelalte și astfel nu ajung la eficiența dorită. Pentru viteza maximă, elicele folosite trebuie să fie bi pale .

Forma de glonț limitează drona enorm datorită capacului terminat brusc. Se creează o zonă de depresiune care crește mult rezistența la înaintare. Pentru versiunea următoare am decisă să corectez asta folosind o coadă adăugată în locul capacului din spate pentru o eficiență aerodinamică mai bună.



Control

Unghiul de montare al camerei este prea mic, camera privește prea jos, iar la viteze mari, când drona este aproape orizontal înclinată, nu poți vedea direcția de zbor corect (linia orizontului). Asta poate influența pilotul să țină „nasul dronei” prea sus ceea ce strică aerodinamica. Unghiul de înclinare al dronei fata de orizontala în zbor de viteza ar trebui să fie sub 10-15 grade (vom vedea mai târziu în telemetrie).

4. V2: REPROIECTARE ȘI OPTIMIZARE

4.1 De la ce am plecat în reproiectare

Punctele identificate în V1 au indicat trei domenii critice care limitau performanța:

- Rigiditate structurală: PETG-CF nu era suficient pentru vibrații la viteză mare.
- Aerodinamică: Formă de glonț fără coadă, spațiu mort între motoare, proximitate aripă-elice.
- Powertrain: Elice tripale în „wake interference”.

4.2 Aerodinamica CFD Optimizare în Solidworks

Parametrii de rulare în SolidWorks:

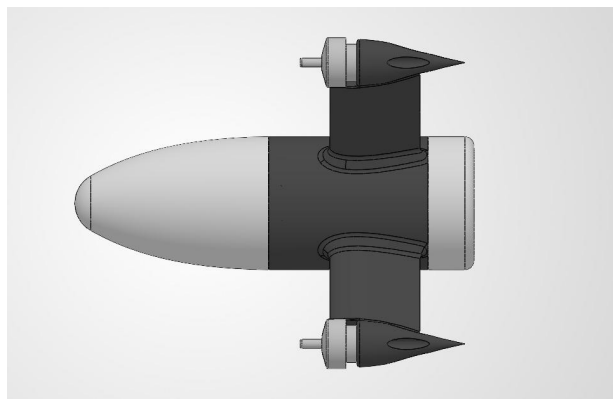
PRESIUNE: 101325 Pa

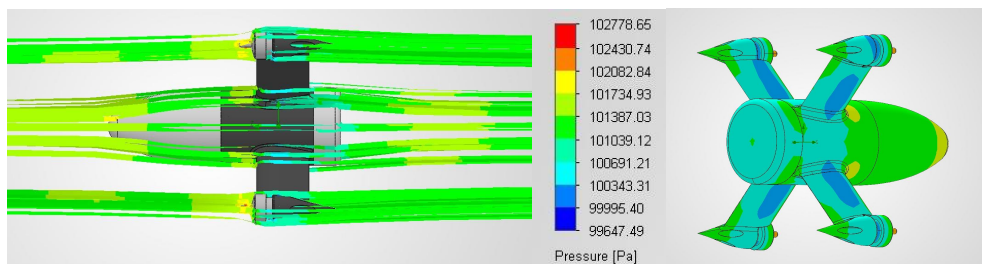
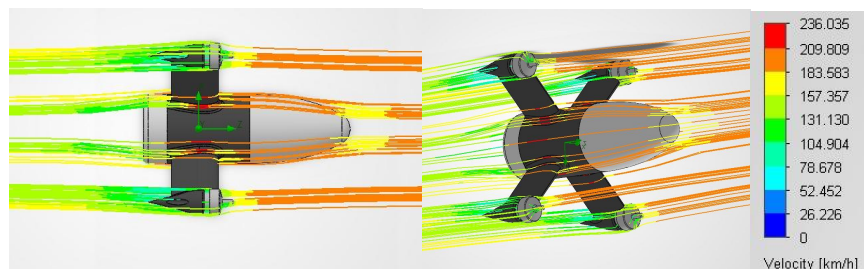
TEMPERATURĂ: 301.15 K

DENSITATE AER: 1.2 kg/m^3 , care reprezintă aerul la presiune atmosferică standard (101.325 Pa) și o temperatură de 20°C

Nivel de mesh: 5, cu mesh uniform și rafinare avansată a canalelor activată
Fiecare drona a fost testată într-un domeniu de calcul de $0.6 \times 0.6 \times 1.2 \text{ m}$, drona fiind amplasată în centru.

V1





V1- 200 km/h, roughness 35 micrometers

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
GG Force (Z) 1	-7.97127 N	Achieved (IT = 73)	0.475868 N	-7.98809 N

Din analiza CFD a forței de drag, am dedus ca versiunea inițială are drag semnificativ mai mare fata de cele optimizate. Se vede din diferențele mari de viteza ale flow-ului de aer si depresiunea din spatele capacului din spate. Astfel am creat 3 versiuni optimizate cea mai scurta are cel mai mic drag aerodinamic. Cu toate acestea, în practica, nu am putut executa cea mai mica versiune deoarece compartimentul desemnat bateriei nu era destul de mare pentru a înmagazina bateria. **Așadar, am mers pe versiunea ușor mai lunga, ce îmi permitea să montez bateria (v2 în pozele de mai jos).**

V2- 200 km/h

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
GG Force (Z) 1	-5.11572 N	Achieved (IT = 74)	0.282367 N	-5.12001 N

V2 long- 200 km/h

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
GG Force (Z) 1	-8.21284 N	Achieved (IT = 75)	0.479521 N	-8.2127 N

V2 short- 200 km/h

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
GG Force (Z) 1	-4.50253 N	Achieved (IT = 74)	0.213286 N	-4.49645 N

V2- 300 km/h

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
GG Force (Z) 1	-11.5909 N	Achieved (IT = 74)	0.486025 N	-11.6199 N

V2 long- 300 km/h

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
GG Force (Z) 1	-18.6306 N	Achieved (IT = 75)	0.708872 N	-18.5931 N

V2 short- 300 km/h

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
GG Force (Z) 1	-10.1337 N	Achieved (IT = 74)	0.333866 N	-10.1591 N

V2- 400 km/h

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
GG Force (Z) 1	-20.9192 N	Achieved (IT = 74)	0.753939 N	-20.9121 N

V2 long- 400 km/h

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
GG Force (Z) 1	-34.4682 N	Achieved (IT = 75)	1.15851 N	-34.2877 N

V2 short- 400 km/h

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
GG Force (Z) 1	-18.2977 N	Achieved (IT = 74)	0.489981 N	-18.3211 N

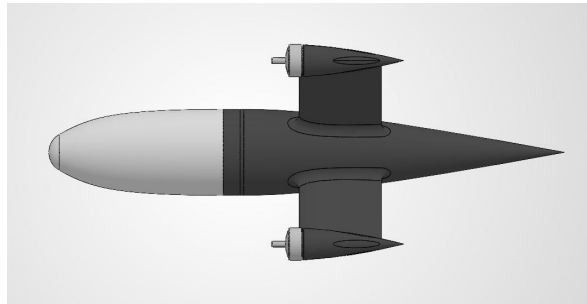
În concluzie:

Varianta Dronă	Aria Secțiune (A)	CD (200 km/h)	CD (300 km/h)	CD (400 km/h)	Mean CD
V1	9670 mm ²	0.458	-	-	0.458
V2 (370.5mm)	9100 mm ²	0.312	0.314	0.318	0.315
V2_long (438.5mm)	9100 mm ²	0.500	0.503	0.522	0.508
V2_short (350mm)	9100 mm ²	0.274	0.275	0.279	0.276

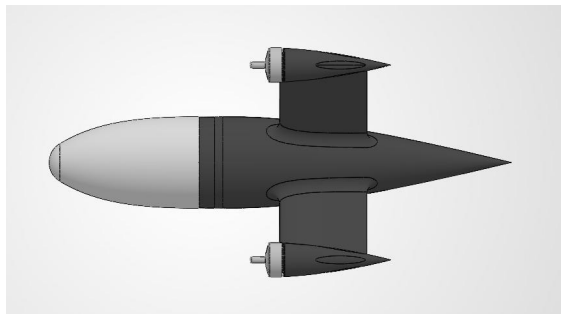
4.3 Proiectarea finală optimizată V2

Designul dronei în Fusion 360 este:

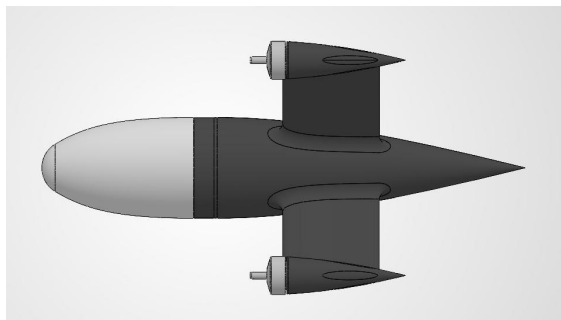
OPTIMIZAT V2 LONG



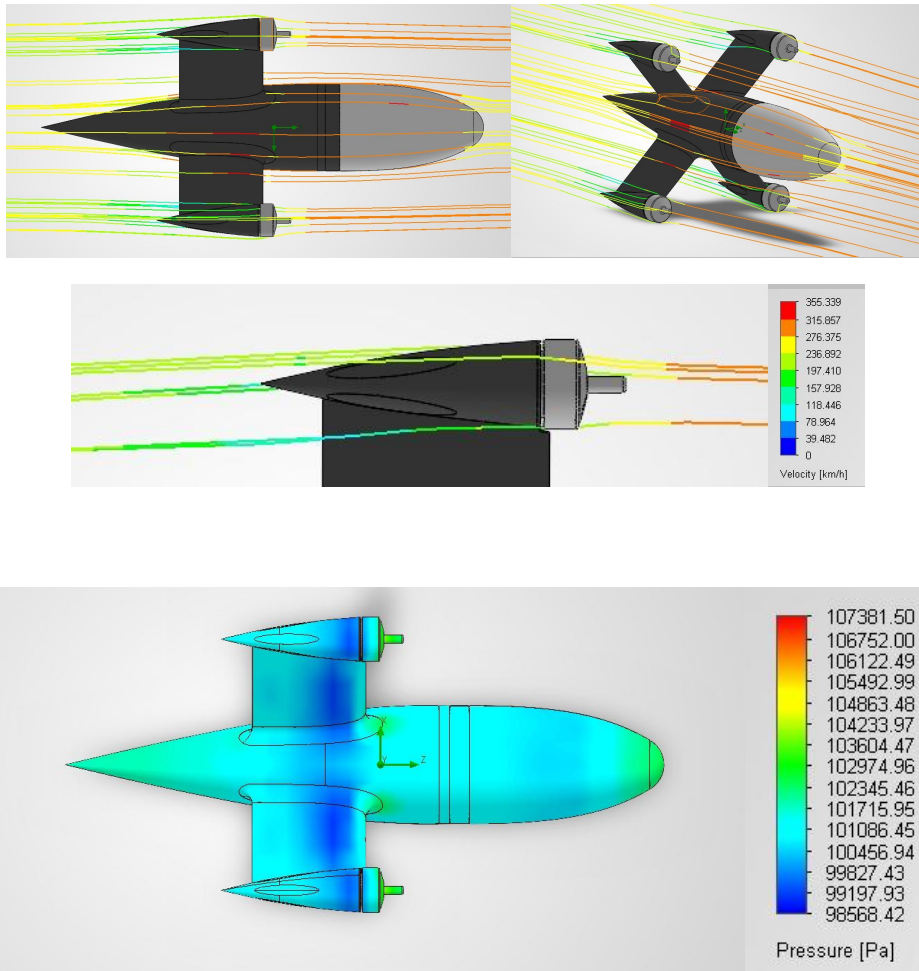
OPTIMIZAT V2



OPTIMIZAT V2 SHORT (cca. 2cm mai scurt)

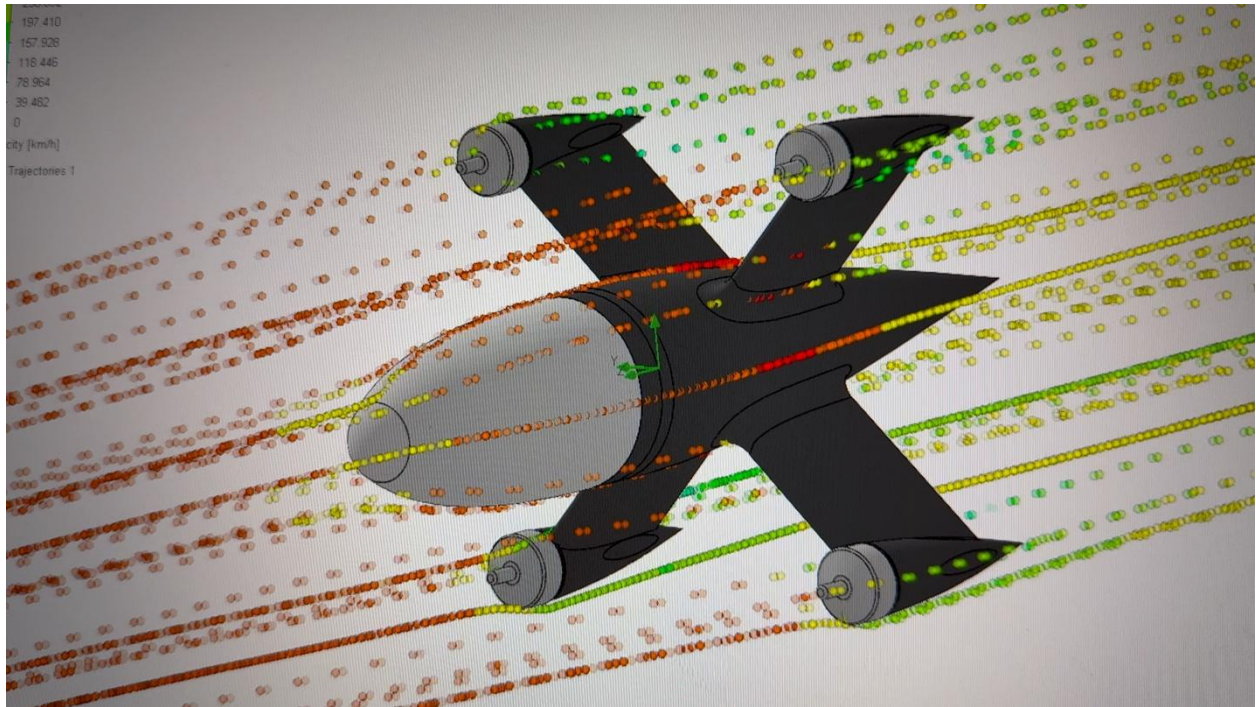


VIZUALIZAREA CURGERII V2

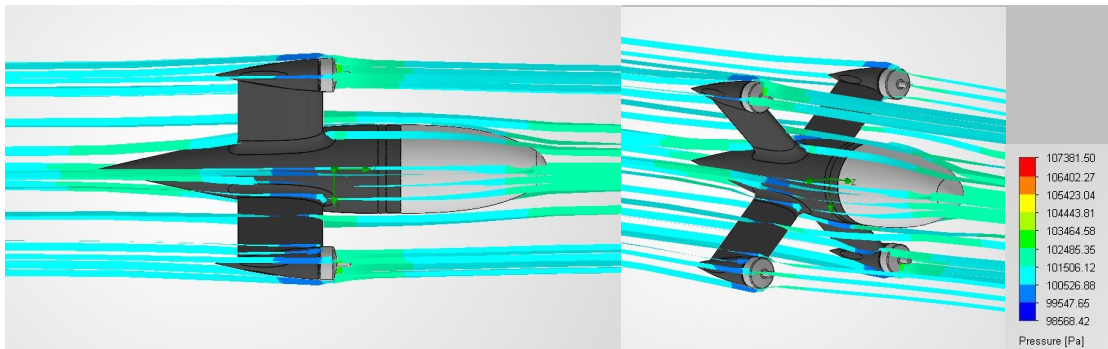


Simulările nu arata desprinderi ale flow-ului si astfel nu se creează turbulente notabile. Accelerări se vad pe motoare si intre brațe dar nu generează desprinderi masive sau turbulențe haotice (*wake separation*) vizibile în aceste condiții de curgere laminară

SIMULARE VIDEO



ANALIZA PRESIUNII



4.4 V2.0 Execuția Practică

Pentru versiunea 2, am schimbat materialul folosit pentru corpul principal. După ceva studiu lucrurile au fost destul de clare. PPA-CF este un material de uz industrial (metal grade) și este ideal pentru cadrul unei drone deoarece oferă o rigiditate structurală extremă și un raport rezistență-greutate foarte bun, eliminând vibrațiile în zbor pentru o stabilitate maximă. De asemenea, pentru capace, am folosit PETG-CF în loc de PETG normal, pentru a reduce greutatea dronei (densitatea filamentului PETG folosit este de $1,27 \text{ g/cm}^3$, în timp ce densitatea PETG-CF este mai scăzută, la $1,24 \text{ g/cm}^3$). Ca idee am încercat și PLA AERO, l-am cam cumpărat degeaba. Este un material extrem de ușor dar spongios și sfărâmicos, adică nicio șansă să faceți piese relativ mici din el pentru că nu rezista. Mai mult nu e ok nici la piese care se îmbina și necesita o oarecare rezistență la zonele de îmbinare. Mai exact este perfect pentru realizarea unor fuzelaje care se aplica pe o structura de rezistență existentă și multă grija la forțele aerodinamice (viteza) să nu fie smuls/distrus complet în zbor. E păcat pentru că teoretic salvam multe zeci de grame dacă reușeam să îl folosesc la capacele superior și inferior al fuzelajului..

Mai mult, pentru a ușura drona cât mai mult am avut mai multe versiuni de capace pe care le-am imprimat cu mai multe grosimi ale pereților. În final am reușit să scad greutatea cu circa 40 de grame și am ajuns la 780 grame greutatea finală (configurația cu motoare 1950 KV). Nu e puțin să scazi 5% dar să nu afectezi rezistența pieselor dincolo de ceea ce e nevoie să-și îndeplinească scopul.

Pentru a măsura rezistența bratelor dronei faceți un calcul de forță pe care motoarele îl exercită. Calculul teoretic e destul de complicat dar am putut să estimez câteva kgf per motor la configurația mea. Puneți cadrul pe masă îl fixați cumva și atârnați de brat o greutate de 2-3 kg, urmărind deformarea lui. Dacă la PETG cadrul se deforma cu 3-4 mm, la PPA-CF nu am reușit să determinăm. Super rigid și super promițător.

Pentru V2, optimizarea aerodinamică a fost obiectivul principal. Prima schimbare a fost regândirea completă a cadrului. Pentru obiectivul meu, să ating peste 300 km/h, se recomandă în literatura un raport lungime lățime (grosimea main body) între 5:1 și 6:1.

V1 avea diametrul maxim al fuzelajului de 78 mm și lăsa destul de mult spațiu pentru montare și cabluri. Pentru a maximiza aerodinamica dronei, am redus diametrul maxim al dronei la 73 mm, astfel micșorând și lungimea maximă a dronei și greutatea sa.

Pentru brațele dronei, am urmărit același raport, schimbând de la profilul NACA 0030 la NACA 0021, care îmi permite să mențin drona în zona parametrilor aerodinamici recomandăți. Ultimele două unități din numărul unei aripi NACA reprezintă procentul care este lățimea aripii din lungime (aproximativ 5:1 pentru NACA 0021). În fapt am folosit cea mai îngustă aripă posibilă care să îmi permită totuși să trec prin ea de-a lungul ei un canal în care să încăpa cele trei fire de la motor. Esențial pentru că altfel nu ajungeam nicăieri.

Fuzelajul dronei este alcătuit din nou din 3 părți, dar capacul inferior nu se mai înșurubează; este montat prin niște cleme și lipit cu 2 benzi de tape (scoci) industrial pentru siguranță. În plus, pentru o formă aerodinamică mai optimă, compartimentul pentru baterie al dronei nu mai este cilindric, ci o secțiune de con, astfel micșorând suprafața de contact a dronei cu aerul. Prelungirile motoarelor au fost și ele alungite, conform raportului recomandat.

Pe zona de putere, am trecut de la elicele cu trei pale la elicele bipale GEMFAN 51512R 2-blade. Aceste pale am descoperit practic că au pasul de 5 inch. Noi le-am cumpărat ca fiind de 4 inch dar am descoperit că drona avea o viteză mai mare decât cea teoretică, ceea ce era imposibil și deducția a fost că au pasul de 5 inch. De pe site-ul Gemfan...

„Caracteristici principale

- Model: Flash 5152
- Număr de pale: 2
- Diametru: ~131 mm (5.1 inch)
- Pas: 4.2 inch"

Am printat mai multe versiuni de test, fie pentru validarea îmbinării pieselor și toleranțele admise, fie pentru rafinamentul unor detalii fine cum sunt îmbinările din spatele motoarelor care astupa găurile șuruburilor pentru aerodinamica.

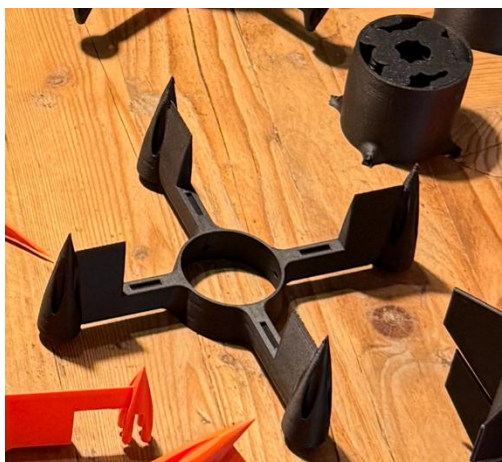


Cam așa a arătat după reimprimare, o versiune aproape finală.



Am ales poza asta pentru că așa se vad cel mai bine îmbinările dintre capacul din spate și main body, atât pe zona centrala conica cât și de-a lungul aripilor și în final capace motoare.

A fost o soluție care s-a născut din adaptarea la constrângeri reale. În timpul imprimării cadrului pentru V2, s-a oprit curentul și piesă a fost compromisă. După reînceperea imprimării și finalizarea ei, un test de rezistență a făcut piesă să cedeze. Acolo unde imprimanta se oprește, materialul se răcește iar la reluare nicio șansă să se lipească ca la o imprimare neîntreruptă corectă. Asta fiind situația, în planul acela piesă avea o problema structurala de rezistentă. Noul cadru imprimat s-a spart în două:



O rolă de filament PPA-CF este scumpă și are numai 750 de grame, destul pentru numai 2 iterații de cadru. Odată cu eșecul primei imprimări, a venit un stres major când am reîncercat imprimarea cadrului.

Într-un mod ironic, și a doua imprimare a eșuat, dar în alt mod. Filamentul folosit s-a rupt și a lăsat a doua versiune numai 70% gata. Nu îmi permiteam o nouă rolă de filament, așadar a trebuit să lucrez cu ce aveam.

Din fericire, cadrul neterminat conținea părțile esențiale din piesă, așadar am adaptat restul pieselor la ce aveam. Schimbarea majoră a avut loc la nivelul cozii, unde a trebuit să integrez capetele aripilor și cozile capacelor motoarelor în capacul posterior.



Oarecum surprinzător, eșuarea imprimării mi-a permis să rezolv o problemă care îmi creștea dragul aerodinamic destul de mult: găurile pentru montarea motoarelor așa cum spuneam mai sus.

Am creat niște picioare verticale care să intre în găurile motoarelor dar datorită orientării la imprimare, aceste prelungiri au fost destul de fragile. Pentru a le îmbunătăți rezistența, am implementat niște fante verticale pentru mai multă rezistență structurală iar versiunea finala e cam așa:



4.5 V2.1 - Rafinări mecanice

După printarea unui cadru de test pentru V2.0, am remarcat că sistemul de prindere nu rămânea în poziție optimă. Așadar, pentru V2.1, schimbarea a fost una strict mecanică, în care sistemul de prindere al cozii a fost rigidizat.

De asemenea aici am ușurat drona cât am putut. Am refăcut piesele la grosimea minimă considerată de mine, care cred că se mai poate îmbunătăți. La același set de piese am câștigat 40 grame din proiectarea atentă a pereților și structurilor de rezistență ale piesei:



5. Teste reale (187 km/h → 265.3 km/h)

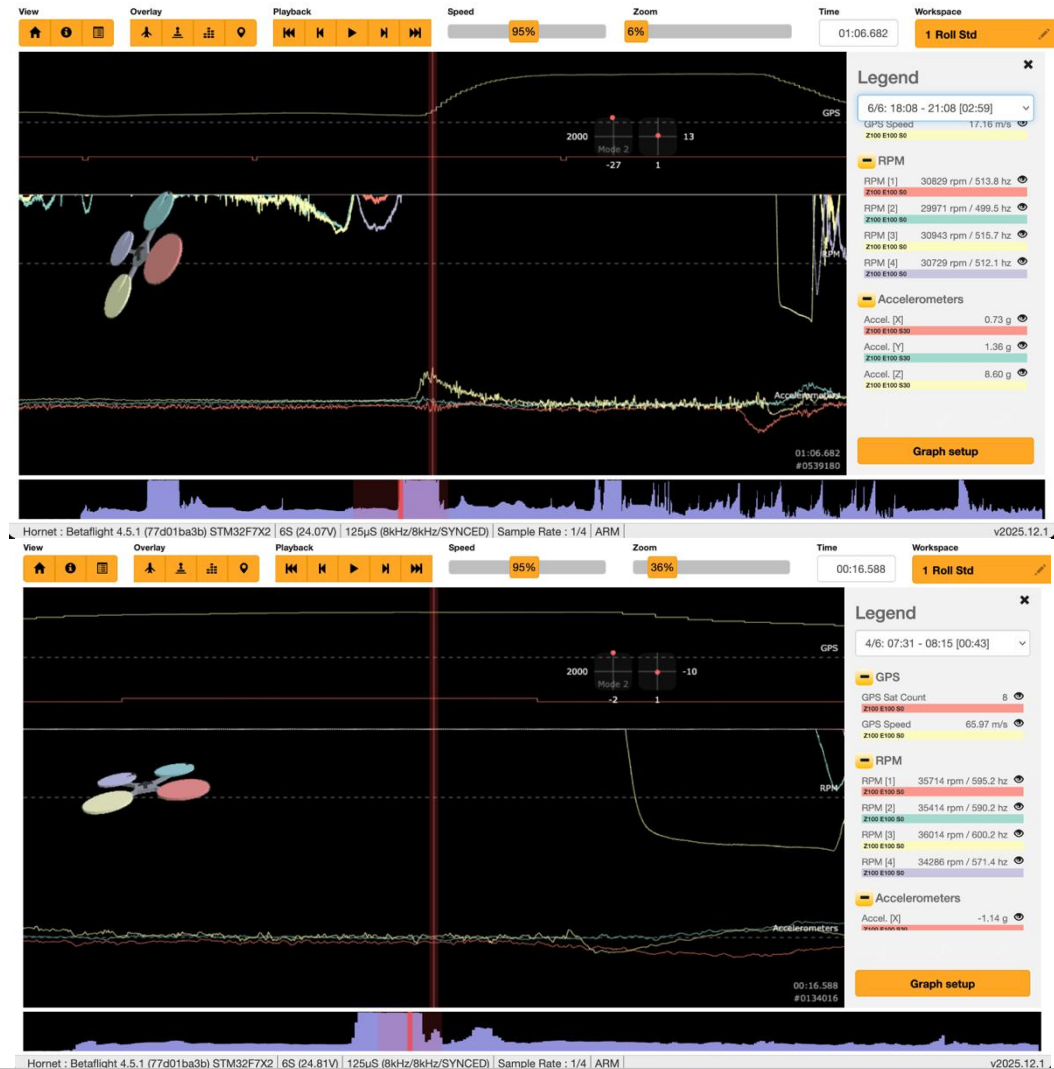
Între timp am învățat să accesez telemetria și toate testele au fost măsurate cu electronica internă a dronei, FC + GPS.

Am făcut două tipuri de teste cu elicea cu 2 pale și cu cea cu trei pale iar rezultatele au fost conform așteptărilor:

- Viteza maximă cu 2 pale - 265.3 Kmph;
- Accelerație maximă cu 3 pale - 8,6g;

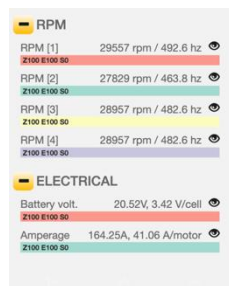
Acum testele cu imagini din telemetrie.

ELICE CU 3 PALE

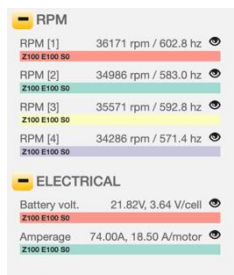


În panoul din dreapta se vad valorile instantanee de la linia roșie verticală. Ce observăm este ca:

- Vmax - 65.97m/s;
- Accelația maximă 8.6g (nice!);
- RPM la Vmax cam 35.200 în medie;
- Consum la accelerație maximă 41 A/motor (limitare măsurare senzor);



- Consum la vmax



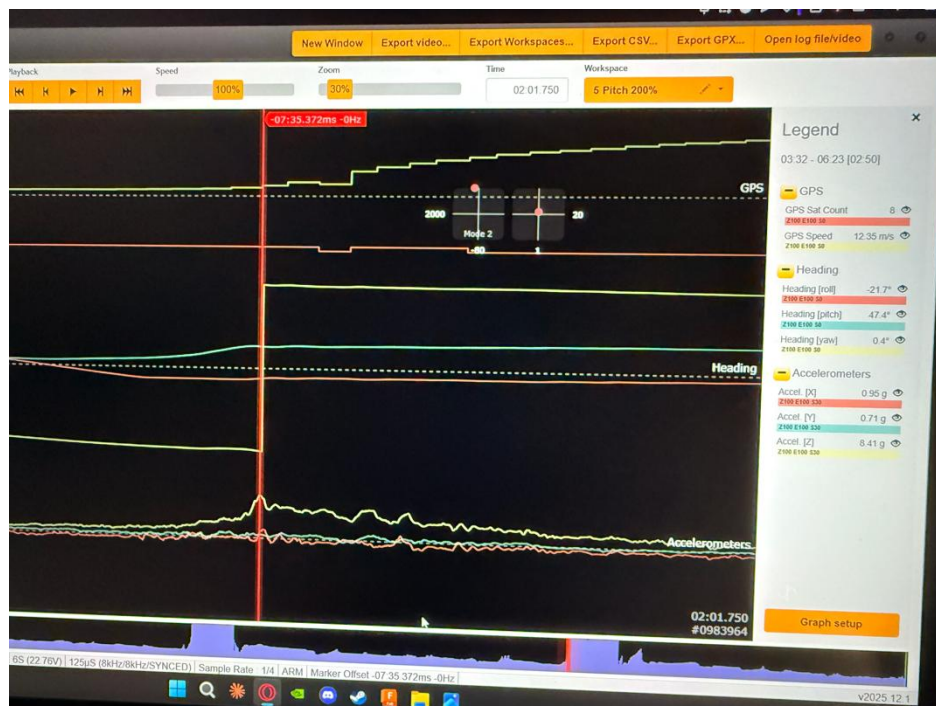
Ce deducem din cele de mai sus la Vmax este:

- **Tracțiune activă eficientă:** La **88.5%**, elicea funcționează într-o zonă de tracțiune pozitivă excelentă. Nu a ajuns încă în regimul de descărcare completă (>100%), împingând activ aerul în spate pentru a accelera sau a menține viteza de 237.6 km/h.
- **Sarcina electrică redusă:** Amperajul extras de doar **18.50 A/motor (total 74.00 A)** la peste **35,000 RPM** arată că rezistența la înaintare (drag) întâmpinată de fuzelaj la 66 m/s este extrem de redusă, permițând motoarelor să funcționeze lejer fără supraîncălzire sau curenți de vârf masivi.

Concluzie:

Parametru	Zbor de Viteză Stabilizat (66 m/s)	Accelerație Maximă / Full Throttle
Curent Total	74.00 A (18.50 A/motor)	>164.25 A (41.06 A/motor) – limitare masurare
Tensiune Celulă	3.64 V/cell	3.42 V/cell (Sag accentuat)
RPM Mediu	~35,253 RPM	~28,825 - 30,618 RPM
Accelerație Z (Peak)	Moderat	7.08g - 8.60g

ELICE CU 2 PALE



În panoul din dreapta se vad valorile instantanee de la linia roșie verticala. Ce observam este ca:

- Vmax - 73.7m/s;
- Accelerația maximă 8.4g;

- RPM la Vmax cam 36.000 în medie;
- Consum la accelerație maximă 28.39 A/motor:



- Consum la vmax



CONCLUZIE

Comparativ: Configurație 2 Pale vs. 3 Pale

Parametru	Configurație 2 Pale	Configurație 3 Pale	Diferență / Eficiență
Viteză Înregistrată	73.70 m/s (265.3 km/h)	66.00 m/s (237.6 km/h)	+11.7% viteză superioară
RPM Mediu la \$v_{\text{max}}\$	~36,100 RPM	~35,253 RPM	+847 RPM (frecare rotațională redusă)
Curent Viteză Maximă	38.80 A (9.70 A/motor)	74.00 A (18.50 A/motor)	-47.5% consum curent
Curent Accelerație Max	113.55 A (28.39 A/motor)	>164.25 A (41.06 A/motor limitare senzor)	-30.8% solicitare pe baterie

Accelerație Maximă (Z)	8.41 g	8.60 g	Performanță dinamică aproape identică
Sag Tensiune (Peak)	3.32 V/celulă	3.42 V/celulă*	Solicitare mai mică per total

- posibil bateria mai încărcată nu este neapărat logic.

Ce deducem:

- 1. Eficiență Aerodinamică Masivă (Curent redus la jumătate la Vmax):** Cea mai importantă concluzie este că la viteza de top (73.7m/s), cele 2 pale consumă doar **9.70 A/motor**, comparativ cu **18.50 A/motor** la elicele cu 3 pale. Această reducere de **~47.5% a consumului** la o viteză chiar mai mare demonstrează că o elice cu 2 pale elimină o cantitate uriașă de drag și interferențe aerodinamice între pale.
- 2. Regimul de Funcționare al Pasului (Slip minim):**
 - La **36,100 RPM** și un pas ipotetic de **5.1 inchi**, viteza teoretică a pasului este approx 77.94 m/s;
 - Raportul la viteza reală (73.70 m/s) este 94.56%. Elicea funcționează la o alunecare (slip) de doar 5.44%, ceea ce înseamnă că fuzelajul are un drag minimal, permițând elicei să transforme aproape toată turația în avans direct ceea ce mi-a validat practic calculele din CFD;
- 3. Analiza spectrală din telemetrie** nu a indicat vibrații ceea ce a validat cu succes alegerea PPA-CF și designul main body.
- 4. Din păcate** nu am depășit 300Kmph așa cum mi-am propus dar acum știu ce trebuie să fac:
 - a.** Motoarele sunt în regim normal, au rezerva de putere -> pot crește pasul elicei spre o viteză mai mare;
 - b.** Pot schimba motoarele cu unele cu KV mai mare (urca mai mult în RPM);
 - c.** La varianta b, trebuie avut grijă să nu ajung cu elicele în regim transonic (> Mach 0.75), căci se vor indici vibrații și poate alt gen de probleme pe care nu le anticipez.

6. MODERNIZAREA MOTOARELOR ȘI ELICELOR

În concluzie am decis să facem ambii pași. Motoarele inițiale T-Motor F60 PRO V 1950 KV și-au devenit limita RPM, nu limita de putere. Pentru a atinge viteze mai mari, era nevoie de o treaptă de reducere mai mică, ceea ce necesita motoare cu KV mai înalt.

Pentru elice am decis să cautam variante cu pas mai mare la dimensiunea de 5 inch.

Nu în ultimul rand, pentru a acomoda motoarele mai puternice, am făcut upgrade la ESC de la varianta 55A la 65A (per motor). Am estimat vârfuri de consum de peste 65A dar spike-urile fiind scurte am sperat ca totul să fie ok. Oricum altă varianta folosind bateria 6S nu exista pentru ESC.

Am mizat pe o arhitectura de tip „dragster”, putere maximă, accelerație maximă, 4-5 secunde pana când drona ajunge la viteza de croazieră și astfel nu se petrec încălziri semnificative care să ajungă în zona distructivă.

6.1 Decizia de modernizare a motoarelor

Motoarele inițiale T-Motor F60 PRO V 1950 KV și-au devenit limita RPM, nu limita de putere. Pentru a atinge viteze mai mari, era nevoie de o treaptă de reducere mai mică, ceea ce necesita motoare cu KV mai înalt.

Calea de upgrade, T-Motor F60 Pro V 2550 KV. Rațiune: KV mai mare = raport de reducere mai mic = posibilitatea de a folosi elice cu pas mai mare.

6.2 Alegerea elicilor

GEMFAN 5152R (pitch real 5.2", chiar dacă listing-urile publice spun 4.2") a fost baseline-ul, cu 265.3 km/h verificați. Rigid și predictibil.

Descoperirea testelor anterioare:

- rigiditatea palei foarte importantă pentru viteză mare;
- numărul de pale 2 pentru viteza;
- pas necesar mai mare.

Selecție finală: APC PROP - BIPALE 5x7.5 CW și APC PROP - BIPALE 5x7.5 CCW. Ne-ar fi plăcut un pas și mai mare dar nu exista și în plus există un risc la viteze mici ca drona să nu poată decola. E o poveste mai lungă cu eficiența elicilor și unghiul de atac pe care o puteți studia dacă va place ideea.

Așa am ajuns la pasul maxim posibil pentru elicele de 5 inch dar a trebuit să avem grija la RPM maxim. APC indica RPM maxim la aceste elice este 38.000.

Având în vedere motoarele 2500KV și bateria 6S teoria spune că în gol motoarele ar ajunge la circa 60.000 RPM, ceea ce m-a făcut să mă gândesc cum organizez testele fără să distrug drona la prima încercare.

6.3 Teste progresive de viteză

După mai multe consultări pe baza parametrilor de zbor cu diverse variante de AI, am ajuns la concluzia că voi limita puterea (acelerație) la trei valori:

- 67% iar apoi în funcție de RPM voi determina următorul pas; determinarea va fi fost în funcție de RPM obținut și viteza maximă.

TEST 67%



Sumar Telemetrie la 312 km/h

- **Viteză GPS:** 86.65 m/s (echivalentul a 311.94 km/h)
- **Altitudine GPS (ASL):** 98.90 m
- **Turații Motoare (RPM):**
 - Motor 1: 27,557 RPM (459.2 Hz)
 - Motor 2: 25,743 RPM (429.0 Hz)
 - Motor 3: 27,557 RPM (459.2 Hz)
 - Motor 4: 26,057 RPM (434.2 Hz)
 - **Media Turațiilor:** 26,728.5 RPM
- **Comandă Throttle (RC Command):** 2000 μ s (100% gaz deschis)
- **Sistem Electric:**
 - **Amperaj Total:** 77.25 A (19.31 A / motor)
 - **Tensiune Baterie:** 20.50 V (3.42 V / celulă)

Concluzie: drona a depășit 300 Km/h iar sistemul este mai mult decât OK!!! Nivelul de consum de doar circa 20 A per motor și RPM mediu de circa 26.000 m-0a încurajat maxim pentru următorul pas, limitare 85%.

TEST 85%



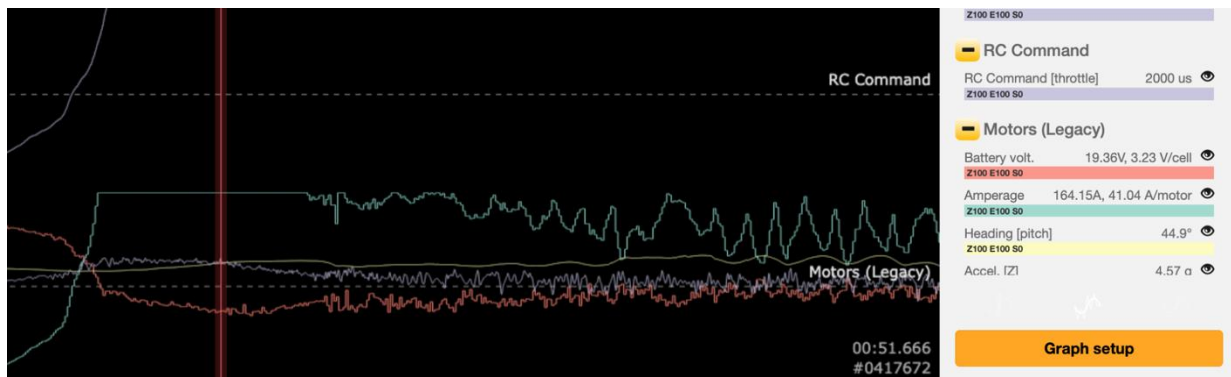
Concluziile în tabel:

Parametru	Înainte de Throttle Cut (00:58.014)	După Throttle Cut (00:58.240)	Variație / Efect
Comandă Gaz (Throttle)	1957 μ s (~96%)	1432 μ s	Tăiere bruscă de acclerație (-525 μ s)
Viteză GPS	101.77 m/s (366.37 km/h)	104.44 m/s (375.98 km/h)	+9.61 km/h (Inerție & latență GPS)
Altitudine GPS (ASL)	178.20 m	179.60 m	+1.40 m
Consum Curent Total	125.75 A	10.25 A	-115.50 A (-91.8%)
Consum per Motor	31.44 A/motor	2.56 A/motor	-28.88 A/motor
Tensiune Totală Baterie	20.09 V	21.71 V	+1.62 V (Revenire din voltage sag)
Tensiune per Celulă	3.35 V/celulă	3.62 V/celulă	+0.27 V/celulă
Turație Medie Motoare	~29,647 RPM	~23,786 RPM	-5,861 RPM

RPM Motor 1	31,286 RPM (521.4 Hz)	24,557 RPM (409.2 Hz)	-6,729 RPM
RPM Motor 2	28,157 RPM (465.9 Hz)	23,043 RPM (384.0 Hz)	-5,114 RPM
RPM Motor 3	31,400 RPM (523.3 Hz)	25,286 RPM (421.4 Hz)	-6,114 RPM
RPM Motor 4	27,743 RPM (462.3 Hz)	22,257 RPM (370.9 Hz)	-5,486 RPM
Pitch Heading	31.4°	23.8°	-7.6°
Accelerație Z	+1.24 g	-1.24 g	-2.48 g (Trecere în fază neutră/balistică)

Așadar viteza de 376 Km/h este reala, nu e o variație semnificativă de altitudine ci doar inerție de măsurare GPS.

Curentul maxim absorbit a depășit 41 A per motor!!! Acesta e un prim semn de alarma, am atins limita de măsurare a ESC-ului:



Linia verde care indica consumul în A este orizontala, dreapta, nenaturala, indica o limitare a sistemului nu o valoare reala. Adică consumul a fost de peste 41 A per motor dar sistemul nu a mai putut masura. Pe masura ce drona a accelerat curentul a revenit sub aceasta valoare (zona variata de după plat).

Pe de altă parte o altă validare a aerodinamicii dronei:

Gradul de alunecare (*Slip Value*):

$$\text{Slip (\%)} = \left(1 - \frac{V_{real}}{V_{th}} \right) \times 100 = \left(1 - \frac{362.23}{329.77} \right) \times 100 = -9.84\%$$

Asta înseamnă că drona merge în regim de elice descărcata cu viteza mai mare decât cea data de pitch 7 inch al elicei! Nice. Elicea intra în regim de portanta pura la unghi de atac negativ.

O altă explicație ar fi Efectul de Flexiune Dinamică a Palei (Blade Flex/Twist). Valoarea negativă de alunecare (-9.84%) reconfirmă faptul că la turații și viteze mari (30.000 RPM, 376 km/h), palele elicei suferă o deformare mecanică cauzată de presiunea dinamică a aerului. Aceasta mărește pasul geometric efectiv de la 7.0" permițând dronei să depășească viteza teoretică a pasului static.

În final asta ne-a încurajat să mergem către testul de 100%.

TEST 100%



Practic 420 Km/h la primul run! Dar din păcate la al doilea run s-a întâmplat dezastrul.

De remarcat curentul linia verde, e practic complet limitat pe întreaga durată a zborului.

Sistem Electric:

- **Consum Curent: 164.25 A total (41.06 A / motor – plafon de senzor)**
- **Tensiune Baterie: 18.91 V total (3.15 V / celulă – sag puternic sub sarcină de vârf - ocazie cu care bateria se încinge).**

Cu extrapolarea făcută din sag-ul (scăderea tensiunii la bornele bateriei 6S) putem estima ca în total curentul a depășit 220A (poate 250A) adică mai mult de 55 A per motor, circa 1 KW putere per motor.

Viteză Elicoidală și Regimul Transonic

Viteza rezultantă la vârful palei combină viteza de rotație cu viteza de înaintare:

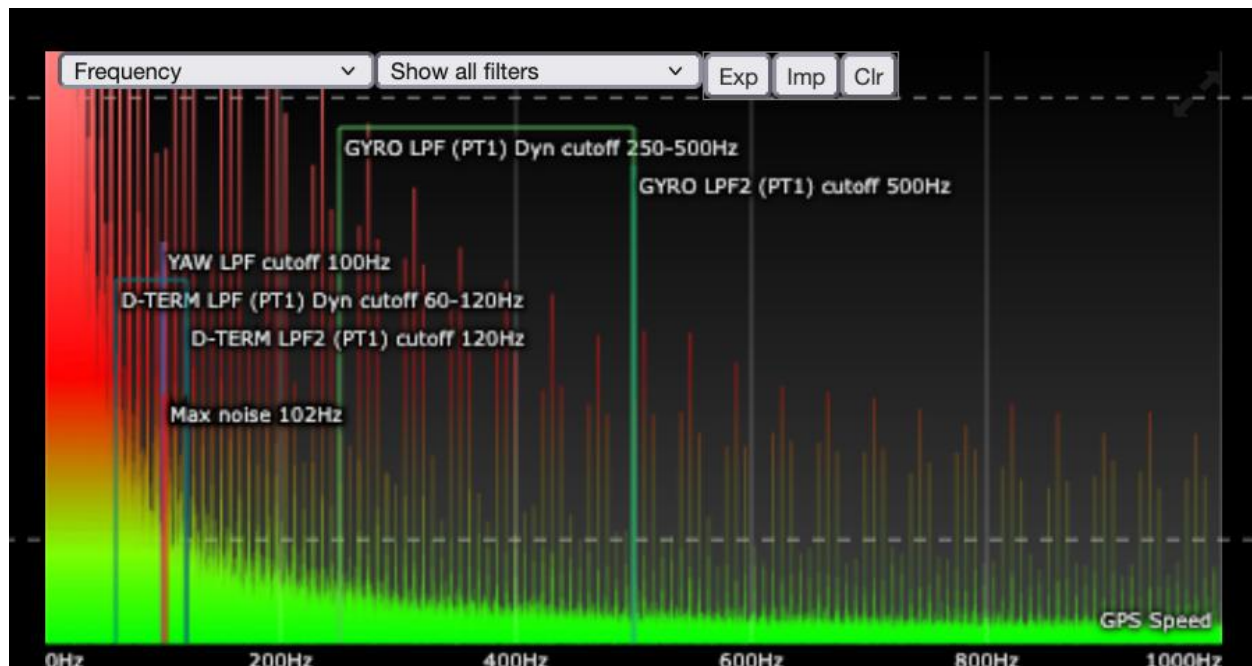
$$v_{\text{tip}} = \sqrt{v_{\text{rot}}^2 + v_{\text{fwd}}^2}$$

La punctul maxim de **420 km/h** (116.65 m/s) și media **32,279 RPM**:

- **Viteză rotație: = 214.6 m/s**
- **Viteză totală la vârf: 244.2 m/s**
- **Număr Mach: 244.2 / 343=0.71**

Elicea de 7 inch funcționează la **Mach 0.71–0.73**, adică chiar sub limita de propagare a undelor de șoc transonice (Mach 0.75+).

Asta este demonstrat și de analiza spectrală data de Controler de zbor:



Practic vedem vibrații în zona de frecvență joasă sub 400 Hz nimic semnificativ, ceea ce indică faptul că nu avem perturbații de la elice sau din cauza cadrului dronei.

Concluzii finale teste (sinteza AI din log-urile BlackBox):

Log	Viteză Reală (GPS)	Nivel Gaz (Throttle)	Turație Medie (N)	Tensiune / Curent Motor	Putere / Motor (Pm)	Alunecare (Slip)**	Mach Tip (Mtip)*
67%	312.5 km/h (86.8 m/s)	stick 100%, ieșire motor 61% (limită 67%)	26 600 rpm	20.5 V / 18.4 A (73.7 A total)	378 W	-8.6%	0.57
85%	377.1 km/h (104.8 m/s)	stick 100%, ieșire motor 78% (limită 85%)	31 000 rpm	20.2 V / 32.5 A (130 A total)	656 W	-12.3%	0.68
100%	419.9 km/h (116.65 m/s)	stick 100%, ieșire motor 94%	33 500 rpm	18.9 V / ~53 A estimat (senzor saturat la 164 A în 99% din fereastră)	~1010 W estimat (775 W e limita inferioară măsurată)	-15.8%	0.73

- * - calculele sunt făcute cu AI și cel mai probabil aproximative datorită imposibilității cunoașterii cu exactitate a unghiului de înclinare al dronei față de direcția de deplasare (probabil între 5-35 grade).
- ** - un slip atât de mare se poate justifica fizic doar prin deformarea elicei sau prin faptul că pasul real e mai mare decât cel afișat de producător.

Tabel cu evoluția vitezei:

Test Run /	Motor	Elice	Throttle limit	Viteză	Telemetrie	Status / Observații
V2 Flight 1	1950 KV	GEMFAN 51512R	100%	265.3 km/h	36.1k RPM, 9.7 A/motor	Baseline
2550 KV, 67%	2550 KV	5" x 7.1" pitch	67%	312 km/h	26k RPM, 20 A/motor	OK
2550 KV, 85%	2550 KV	5" x 7.1" pitch	85%	376 km/h	32k RPM, 35 A/motor	OK
2550 KV, 100%	2550 KV	5" x 7.1" pitch	100%	420 km/h	30.8–34.7k RPM, > 164 A (plafon senzor)	Ultimul zbor înainte de prăbușire

7. ANALIZA TERMICĂ, ELECTRICĂ ȘI AERODINAMICĂ

7.1 Performanța motoarelor

Specificațiile T-Motor F60 Pro V pentru variantele de KV:

- Performanță termică: sub 50°C susținut la 266 km/h, sub 70°C la 420 km/h
- Inspecție fizică după zbor: fără deteriorări, motoarele se rotesc liber
- 2550KV este mai lung (înalt) decât 1950KV ceea ce deplasează planul elicelor fata de centrul de greutate - cauza posibila pentru oscilații pe traiectorie la mare viteză

7.2 ESC și limitele de curent

Ansamblul Axisflying Argus Pro 55A a fost schimbat cu 65A pentru a merge la 420 km/h și tolera curent mai mare.

Problemă mare este la senzorul de curent n-am bănuț-o și probabil ca undeva scrie dar e ciudat ca suporta mai mult decât poate să măsoare. Acesta se saturează la 165 A. Curentul real recalculat invers din tensiunea bateriei ~68 A/motor la prăbușire.

Componenta aleasă poate tolera un curent de vârf de **1,5 ori mai mare decât curentul nominal continuu** pe o durată scurtă (de obicei 2–10 secunde). De exemplu, un ESC evaluat la **65A continuu** cu un factor de burst de 1.5x poate rezista la vârfuri de până la **~97,5A per canal** în timpul accelerațiilor maxime, așa ca din acest punct de vedere este ok.

7.3 Performanța bateriei

Tattu 1550 mAh 150C Mark 5: adecvat pentru viteză susținută, dar marja de cădere de tensiune este strânsă. Dacă vrei performanță și mai mare trebuie un V4: trecerea la 200C+ (Tattu 2.0 sau Turnigy Graphene 5S 200C) – reduce căderea de tensiune cu ~2 V ceea ce poate aduce niște sute de RPM în sarcina în plus.

7.4 Analiza retrospectivă a rezistenței aerodinamice

Total CdA analizat pe:

- Clopotele motoarelor
- Carenajele cadrului
- Butucul și axul elicei

Analiza practica pe zona aerodinamică a arătat că drona a ajuns destul de ușor să ruleze cu elicele în regim descărcat.

7.5 Studiul unghiului de înclinare camera video

Ipoteză inițială: înclinare mai mare > rezistență mai mare > pierdere de viteză. Asta rezulta destul de simplu din faptul că dacă drona nu zboară orizontal, secțiunea frontală crește și deci rezistența aerodinamică. Pilotul a indicat ca ar dori camera să țintească mai sus.

Constrângere de montare a camerei: impune minimum +12° înclinare în zbor.

Optimizare încercată: re poziționare camera > 7–8° corecție.

Rezultat: 266 km/h (identic cu rulările la +12°).

Concluzie: unghiul de inclinare nu este un factor limitativ în viteza, cel mai probabil unghiul a fost compensat/modificat de pilot fără să realizeze.

7.6 Îmbunătățiri viitoare pentru V4

- Racordări la baza palei (reduc desprinderea vârtejurilor);
- Interiorul clopotului motorului (comutație mai lină, reduce turbulența);
- ESC heatsink integration – ventilare prin carcasa;
- Recalcularea centrului de greutate față de planul elicei;
- PID tuning - presupunem ca oscilațiile pe verticala la peste 300 Km/h au fost date de PID-uri prea agresive în citirea comenzilor pilotului.

7.6 Date tehnice drona finala

Motoare - T-Motor F60 Pro V 2550 KV

Elici - APC PROP - BIPALE 5x7.5 CW și APC PROP - BIPALE 5x7.5 CCW

ESC - Axisflying Argus Pro 55A și Axisflying Argus Pro 65A

FC - T-Motor F7 FPV Flight Controller

Arie secțiune - 9100 mm²

Lungime - 370.5mm

Greutate – 810 g (configurația finală, cu motoare 2550 KV)

8. ANALIZA ȘI INVESTIGAREA PRĂBUȘIRII

8.1 Incidentul

La al doilea run pe care l-am încercat cu 100% accelerație drona s-a prăbușit la 301.4 km/h. Practic pilotul a pierdut controlul, a încercat să o redreseze și văzând ca se prăbușește a dezarmat-o.

Impactul cu solul a fost la peste 200Km/h și rezultatul îl vedeți mai jos:



8.2 Diagnosticul cauzei principale

Analiza telemetriei Blackbox:

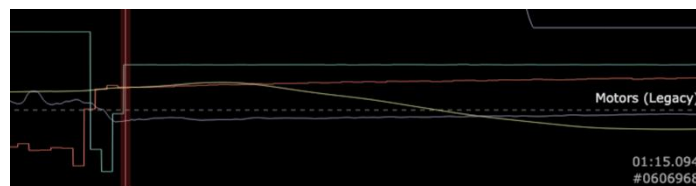


Ce vedem în telemetrie imediat înainte de linia roșie:

- Gaz la 100% pe toată perioada;
- Giroscop calm în momentul colapsului (fără impact, fără lovire de elice)
- Toate cele patru motoare cu turații potrivite în limita a 1.5% până în momentul defectiunii

După linia roșie observam ca:

- Motor 4 RPM scade către 0 VERTICAL (fizic imposibil) timp 1:15:000;
- În același timp curentul consumat rămâne în saturație peste 165 A;
- Curentul scade brusc la 1:15.030 împreună cu decelerarea celorlalte motoare;
- Urmează o variație inexplicabilă în RPM motor 4 și curent iar la 1:15.094 curentul revine la valoarea 129.6A, 32.4A per motor și rămâne FIXA (fizic imposibil) până la disarm;
- Dacă ne uităm exclusiv la graficul de tensiune (roșu) și curent (verde):



- Inițial curentul scade brusc și tensiunea începe să crească (corect);
- Apoi apare saltul de curent la 129.6A iar tensiunea NU SCADE (fizic imposibil);

Luând în calcul cele de mai sus, diagnosticul a fost: ESC - desincronizare pe canal 4.

8.3 Inspecția după prăbușire

Din drona recuperata am testat și validat:

- Teste electrice motoare: toate motoarele se rotesc liber, fără scurtcircuite la carcasă;
- Verificarea diodelor ESC: valori identice pe toate cele patru canale;
- FC in perfecta stare;
- AIR unit distrusă mufa de conectare fizic; camera recuperata;
- Inspecție fizică: condensatorul de magistrală cu un picior rupt



Modul de topire indica arc electric. Scenariu final:

- În fiecare run simulările bazate pe AI de curent depășesc 220-250 A;
- La un asemenea curent apar variații mari de tensiune în baterie și implicit variații mari de curent în condensator;
- Mai mult, în run-ul finalizat cu prăbușirea, bateria era deja încălzită după primul run și rezistența internă scăzuse (particularitățile bateriilor) ceea ce se vede în faptul că sag-ul bateriei a fost mai mic; circa 18.3 Volți la borne în run 2 versus 16.8Volți în primul run (măsurați la 1.5 secunde de la full throttle) ceea ce a dus la un curent și mai mare decât în primul run;

FINAL ROOT CAUSE - Ieșirea condensatorului din circuit a făcut ca variațiile tensiunii bateriei să ajungă în ESC, FC, etc... și cel mai probabil le-a afectat dramatic funcționarea (ESC-ul în fapt), ceea ce a condus la prăbușirea dronei.

8.4 Lecțiile învățate din prăbușire

Ce voi încerca să schimb sau evit în viitor:

- Folosirea unui senzor de curent care se saturează, nu poți avea imaginea completa, trebuie să o completezi cu estimări;
- 68 A/motor este limita reală (calcul estimat pe baza interogării IA);
- Marja de cădere de tensiune a bateriei era strânsă la 420 km/h, cel mai probabil în al doilea run am fi depășit această viteză în zona 430-440 Km/h;
- Fiabilitatea condensatorului este critică pentru aplicații de curent mare - în versiunea următoare capacitatoare puse în paralel pentru a evita o situație similară.

9. LECȚIILE PROIECTULUI ȘI PAȘII URMĂTORI

9.1 Ce am învățat despre iterațiile de proiectare

Validarea CFD este esențială în avansul în performanța la capitolul aerodinamic. Telemetria este sursa primară de adevăr, a învăța să citești și să corelezi informațiile poate oferi o cu totul altă perspectivă decât cea la care te aștepti.

9.2 Gândirea sistemelor

Zborul de mare viteză scoate la iveală un cuplaj strâns: baterie > cădere de tensiune > ESC > comutația motorului. Defectele într-un singur punct (condensatorul) sunt dezastruoase la limitele de performanță. Redundanța nu este posibilă în aplicații limitate de greutate; fiabilitatea este importantă DAR iată că există puncte unde lucrurile pot fi îmbunătățite prin redundanță.

9.3 Modernizarea componentelor pentru o versiune îmbunătățită

Câteva componente mă gândesc să le refac într-o ipotetică versiune viitoare:

- Motoare: lot nou, set împerecheat din fabrică (toate patru testate împreună)
- Battery: 200C+ (Tattu 2.0 / Turnigy Graphene 5S)
- Senzor de curent: senzor dedicat 0-250A (nu cel integrat 4-în-1)
- Setări ESC modificate: „demag compensation” ON, marjă mai mare de calibrare a gazului

9.4 Validarea înainte de zbor

- Testarea motoarelor pe banc la 40A timp de 30 de secunde
- Înregistrarea Blackbox la 8 kHz (rezoluție completă)
- Termografie a ESC-ului la gaz maxim susținut

9.5 Obiective de performanță pentru viitor

Plafon confirmat al ansamblului aeronavă/electronică: 420-440 km/h

Obiectiv următor: trecerea la baterii 8S, creșterea vitezei maxime (necesită reproiectarea ansamblului și reducerea greutateii), cu o țintă de peste 500 km/h.

10. LECȚIILE IA

Am folosit IA de multe ori de-a lungul proiectului. Mă gândeam să scriu cate ceva și despre asta caci nu a fost chiar cum m-am așteptat, în toate sensurile.

Ca și parte pozitiva, in primul rând este un tool foarte puternic fără de care poate ca m-as fi descurcat într-un timp mult mai lung. Modul în care accesezi informațiile este foarte facil și la îndemâna ceea ce te face să avansezi rapid în anumite situații. Totodată m-a ajutat (sper) să fac calcule matematice complexe pe care încă nu le stăpânesc și să fac estimări pe care apoi să le verific în practica.

A fost foarte interesant și pot spune că sunt convins că trebuie să știi să lucrezi cu IA.

Totodată m-am convins că asta nu înseamnă că îți limitezi cunoștințele ci din contra, trebuie să ți le dezvolti. De suficient de multe ori IA îți da informații, calcule, și chiar raționamente greșite. Este extrem de important să le poți detecta dacă ai cunoștințele necesare sau să ai o tehnica de lucru care să te ajute să detectezi situațiile de acest gen.

Cu alte cuvinte e mult mai bine cu IA și poți ajunge unde vrei mai repede, dar în același timp să te bazezi doar pe informațiile de acolo fără să știi ceva despre subiect și cum să le verifici, te poate conduce la o catastrofa.

10.1 ESTIMĂRI IA

Dacă tot închei cu IA, am să pun mai jos și estimările de viteza pentru drona mea, după ce am încărcat toate detaliile despre:

- Aerodinamica și simulări SolidWorks
- Tip motoare;
- Tip baterie; SAG baterie la tracțiune maximă 19V;
- Tip elici;
- Secțiune transversala (arie);
- Temperatura și densitate aer;

„Fără nicio ancorare în zboruri, estimarea mea este în jur de 445 km/h, cu o bandă de 420 până la 470 km/h.

Intrări folosite, toate din afara testelor de zbor:

Motor: F60 Pro V 2550KV, U = 19.0 V sub sarcină

Elice: APC 5x7.5, pas 7.5", 2 pale, coardă ~13 mm

Corp: $CdA = 28.3 \text{ cm}^2$ (CFD V2 la 0°), masă 0.80 kg

Atitudine: NU din log. Rezultă din echilibru, $\tan \psi = G / D$, fără portanța corpului

Rezultate: Fără nicio ancorare în zboruri, estimarea mea este în jur de 445 km/h, cu o bandă de 420 până la 470 km/h."

Ce domină incertitudinea sunt diferențele legate de simularea incompleta a zborului și efectelor diverse cum ar fi faptul că drona zboară înclinat nu complet orizontal. Din log-uri are circa 18 grade în medie cu botul în sus pentru a-și susține greutatea caci are portanța foarte mica. În final înclinarea mărește drag-ul (secțiunea transversală) iar Cd-ul este calculat la 0 grade înclinare. La fel pot fi și alte efecte neluate în calcul pe care nu le-am mai investigat.

În final am fost acolo cu viteza obținută, iar dacă condensatorul mai rezista 10 secunde probabil eram la 430Km/h. Dar așa, nu as fi avut o prăbușire de investigat!

