

Disseny, construcció i vol d'una aeronau no tripulada.

Curs: 2n BAT C
Promoció: 2009-2011

Índex

1. Introducció metodològica	5
1.1. Programes informàtics	6
1.2. Fórmules matemàtiques	6
1.3. Tècniques de construcció	7
2. Introducció	9
2.1. Una mica d'història	9
2.2. Parts de l'avió i les seves funcions	10
2.2.1. Les ales	10
2.2.2. L'empanatge	11
2.2.3. El fuselatge	12
2.2.4. El motor	12
2.3. Física del vol	13
2.3.1. El vol d'un avió està regit per moltes lleis físiques	14
2.3.2. La sustentació requereix potència	15
2.3.3. Resistències aerodinàmiques	15
3. Disseny construcció i vol d'una aeronau no tripulada	17
3.1. Disseny de l'avió	18
3.1.1. Estimació del pes final	18
3.1.2. Càlcul de la superfície alar	18
3.1.3. Empanatge	21
3.1.4. Conicitat	23
3.1.5. Superfícies de control	25
3.1.6. Fuselatge	26
3.1.7. Càlcul d'actuacions	26
3.1.7.1. Velocitat màxima	27
3.1.7.2. Velocitat de pèrdua	28
3.1.7.3. Velocitat ascensional	29

3.1.7.4. Prestacions de planeix	30
3.2 Construcció de l'avió	32
3.2.1. L'empanatge	32
3.2.2. El fuselatge	36
3.2.3. La planta alar	41
3.2.4. Tren d'aterratge.....	43
3.2.5. Avió acabat	45
4. Conclusions.....	46
5. Bibliografia.....	48
6. Annex	50

1-Introducció metodològica

He escollit fer aquest treball ja que és un tema que m'apassiona i al que li dedico molta estona en el meu temps lliure, a més conec gent que s'hi dedica professionalment i als pioners de l'aeromodelisme a Reus; tots ells m'han animat a fer-lo. L'objectiu és poder adquirir els coneixements de física, mecànica, construcció i electricitat necessaris per poder dissenyar i construir un avió experimental no tripulat, controlat mitjançant un sistema de ràdiocomandament.

S'ha de tenir present que no pretenc fer la feina d'un enginyer aeronàutic, sinó que el meu propòsit és posar en pràctica l'essència del meu hobby, l'aeromodelisme.

Després de parlar amb diverses persones i comparar dissenys d'avions entrenadors, acrobàtics, velers purs, amb turbina... he arribat a la conclusió de construir un motoveler que, malgrat la seva simplicitat, mostra una gran elegància en vol i una construcció no gaire complicada.

Per poder realitzar aquest projecte he hagut d'utilitzar fórmules matemàtiques, simuladors i programes d'estudi d'aerodinàmica, programes creadors de perfils alars, una màquina de tall de pòrex computeritzada, eines com una fresadora de mà, una serra de calar, cùters de precisió, una planxa, un trepant de taula, tornavisos, alicates de tall, pinces, entre d'altres.

La informació per poder dissenyar l'avió és, principalment, l'experiència dels membres del club d'Aeromodelisme Ciutat de Reus, a part de la meua pròpia; i els números del 51 al 66 de la revista *RCModel Aero*. En canvi pel procés de la construcció m'he inspirat en altres avions: en la seva estructura interna, en la disposició de l'electrònica, etc.

Cal dir que solament m'he trobat amb una dificultat amb la què no hi comptava: al moment de dissenyar la planta alar no em quadraven els càlculs, després de revisar-los un centenar de vegades ja estava desesperat i vaig considerar la possibilitat de canviar de tema. Finalment em vaig adonar que havia fet una estimació del pes errònia: havia comptat 34.000 grams en lloc de 3.400. Totes les dificultats amb les que posteriorment em vaig trobar ja les havia previst així que no van suposar cap problema.

He d'agrair la bona voluntat, i les ganes d'ajudar-me, del senyor Josep Anguera, a part de ser un dels meus instructors durant el meu aprenentatge en l'art de volar, és un dels pioners de l'aeromodelisme a Reus i propietari de la botiga *Anguera-Hobbies* dedicada a l'aeromodelisme; al meu tutor del treball, per haver-me ajudat al llarg de l'elaboració del mateix; al senyor Jaume Gisped, que ja fa uns anys em va ensenyar a construir petits avions propulsats amb motor de gomes; al senyor Amat Bertran, president del Club d'Aeromodelisme Ciutat de Reus, sense ell i la Junta de Govern d'aquest Club actualment no tindríem un camp de vol; als meus pares, per haver-me recolzat en tot moment i per haver-me ajudat a fer front a les despeses econòmiques del treball.

1.1 Programes informàtics:

Per fer l'estudi del comportament aerodinàmic de l'avió he utilitzat el simulador *XFLR5* i el *QFLR5* que estan preparats pel càlcul de plantes alars a un baix número de Reynolds, és a dir, per a models a escala i avions de mida reduïda.

1.2. Formules matemàtiques:

Per trobar la càrrega alar:

$$Ca = \frac{p}{s}$$

On: Ca és la càrrega alar en g/dm²

P és el pes en grams.

s és la superfície alar en dm²

Per saber l'estil de vol segons la càrrega alar:

$$C = \frac{Ca}{\sqrt{s}}$$

On: C és un coeficient. I pot ser: 2-3 per un veler pur

4-5 per un motoveler

6-8 per un entrenador

9-12 per avions acrobàtics

13-15 per avions de carreres

Ca és la càrrega alar en g/dm²

s és la superfície alar en dm²

Per calcular l'allargament:

$$A = \frac{L}{C}$$

On A és l'allargament.

L és la longitud en mil·límetres.

C és la corda alar mitja en mil·límetres.

Per calcular les dimensions de l'estabilitzador:

$$C_{Ve} = \frac{(se \times d)}{(sa \times c)}$$

On: C_{Ve} és el coeficient de volum de l'estabilitzador.

se és la superfície de l'estabilitzador.

d és la distància entre els centre de pressions de les ales i l'estabilitzador.

sa és la superfície de l'ala.

c és la corda alar mitja.

1.3. Tècniques de construcció:

Les tècniques que he utilitzat són la construcció clàssica i la construcció en sandvitx.

La construcció clàssica es basa en la preparació d'estructures rígides de fusta, de diferents tamany i espessors segons l'esforç que hagi de suportar. Una vegada ja es té l'estructura construïda, es pot entelat amb film termoretràctil aeronàutic o es pot enxapar amb fusta de gruix no superior a 2 mm, per aconseguir més resistència, i posteriorment entelat. Aquesta manera de construir els avions ja es va posar en pràctica en els aparells de Leonardo da Vinci i actualment es pot observar en ultralleugers de fusta o a tots els avions comercials i avionetes, encara que en lloc d'utilitzar fusta i entelat de plàstic són d'alumini aeronàutic i fibres de carboni, de vidre i kèblar.



Aquesta tècnica l'he utilitzada per construir l'empanatge i el fuselatge. A la figura 13 es mostra una ala en construcció, es poden observar les costelles d'alumini i com es comença a enxapar l'extrem d'atac. Aquesta estructura pot aguantar més de 29.400 N de força però en canvi té un pes sorprenentment reduït. (fig.13)¹



A la figura 14 es mostra l'estructura interna del fuselatge d'una RV-7. Consta de quadernes i llarguers d'alumini aeronàutic enxapat amb xapa del mateix material però amb menor espessor. (fig.14)²

La construcció en sandvitx s'utilitza en les ales i empanatges per a aeromodelisme; consisteix en tallar un nucli de pórex, amb una màquina de tall per mitjà d'un fil calent, i posteriorment enxapar-lo amb

¹ Fotografia de la RV-7 construïda per en Alfonso Hernández

² Ídem.

fusta, fibra de vidre o de carboni. És una tècnica moderna, que pot ser més senzilla que la construcció clàssica, en el cas de l'enxapat amb fusta, o molt més complicada, però lleugera i resistent, si se'm planxa amb fibres sintètiques.



(fig.15)³

A la figura 15 hi apareix una ala construïda en sandvitx, amb l'extrem d'atac reforçat amb fibra de carboni, metxa de carboni diagonal per augmentar la rigidesa i un vel de fibra de vidre com a enxapat. És una ala molt resistent i lleugera, per contra és molt cara i difícil de construir.

³ www.hkm-models.com

2-Introducció

2.1-Una mica d'història:

La curiositat per volar acompanya a l'ésser humà des de temps immemorials.

Al 1891 es va trobar a la tomba de PA-di-Amón una figura d'un ocell molt singular, era el primer objecte que va ser dissenyat per volar, era el planejador de Saqqara.

Posteriorment, al segle XV, Leonardo da Vinci va dissenyar una gran quantitat de màquines voladores, però com que no disposava de la tecnologia adequada, no van volar mai. Tot i això, da Vinci va establir els principis del vol dels ocells.

Al segle XVIII, el francès Alphonse Penaud, va crear el *Planophore*, un avió de 15 grams amb motor de tires de cauchú cargolat, va volar 40 metres en 12 segons.

Per fi, el 31 de març del 1903, Richard Pearse va aconseguir fer volar una aeronau tripulada més pesant que l'aire. El va succeir els germans Wright, el 17 de desembre del 1903 amb el *Wright Flyer*, que va recórrer 260 metres en 59 segons. A partir d'aquest moment, va començar la cursa aeronàutica.

En aeromodelisme, poc a poc van aparèixer els avions de vol lliure amb motor a gomes, d'aire comprimit i de CO², fins que el 1930 van sorgir els primers de combustió en miniatura. Posteriorment, es va adaptar l'invent de Guillermo Marconi, la ràdio (1896), permetia controlar els avions amb senyals radioelèctriques, però com que eren molt pesants, cares i plenes de defectes no es van començar a utilitzar fins al 1939. A la dècada dels anys 50, va aparèixer la làmpada subminiatura XFG1, que permetia una gran disminució del pes de l'electrònica. Walter Good va fer les primeres demostracions en vol amb un model que pesava 6 kg i que portava un receptor de 4 làmpades, amb 400 g de pes cada una, necessitava 1 kg de piles de 90 volts per funcionar. A partir d'aquí, l'aeromodelisme ha crescut molt ràpidament, han aparegut les turbines de gas, els pulsoreactors, els motors elèctrics i una gran indústria que permet que els materials siguin molt més assequibles que fa uns anys. A part dels components electrònics i els motors, també han avançat els materials, les tècniques de construcció i rendiment dels avions; ara gran part dels avions es construeixen amb fibres de vidre, carboni i

keblar i aquests avions, sobretot en el cas dels acrobàtics, volen millor i tenen millors prestacions que els avions reals.

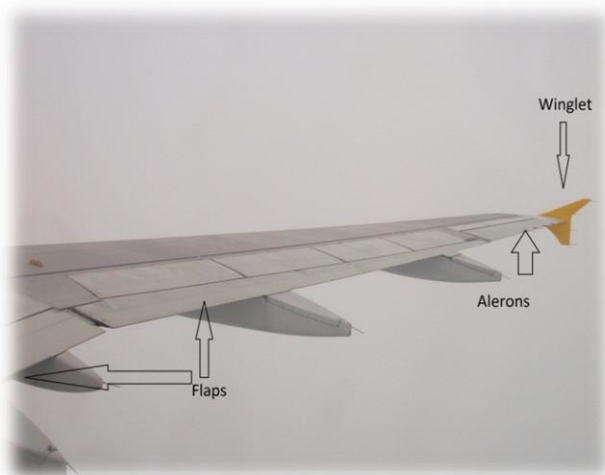
Per poder entendre el llenguatge tècnic aeronàutic, primer ens hem de familiaritzar amb ell:

2.2 Parts d'un avió i les seves funcions

Les parts principals d'un avió són les ales, l'empanatge, el fuselatge i el motor (en cas que en tingui).

2.2.1 Les ales

Les ales dels avions són les encarregades de produir la sustentació. La sustentació és la força que sosté l'avió en vol, és d'igual mòdul i direcció i sentit invers a la força de la gravetat. A les ales hi podem trobar diferents elements:



(fig.1)⁴ Parts de l'ala

Alerons: normalment un a cada semi ala. Són els encarregats d'ajustar, al gust del pilot, l'inclinació en sentit horitzontal; s'utilitzen per anivellar l'avió i per girar. Són elements hipersustentadors que funcionen amb la Llei de la Palanca: un puja i l'altra baixa, si volem inclinar-nos cap a l'esquerra l'aleró de la part de l'ala semi ala esquerra pujarà i així reduirà la sustentació d'aquesta ala; i el de l'ala dreta baixarà augmentant la sustentació d'aquesta ala, així s'aconsegueix més sustentació a l'ala dreta que a l'esquerra i per tant, s'inclina.(fig.1)



(fig.2)⁵ Un slat

Flaps: els flaps són elements hipersustentadors; s'utilitzen en els enlairaments i els aterratges per reduir la velocitat de pèrdua. Els flaps proporcionen sustentació extra a les ales però a canvi d'un augment notable de la resistència aerodinàmica. Estan situats a la part central de l'ala, al costat del fuselatge.(fig.1)

Winglets: Ajuden a evitar el vòrtex, la turbulència que es forma quan l'aire a alta pressió de l'intradós passa a la zona de baixa pressió de l'extradós.(fig.1)

⁴ Imatge extreta de la web airliners.net

⁵ Ídem

Slats: Són, també, elements hipersustentadors, estan situats al llarg de l'envergadura de l'extrem d'atac. A l'avançar cap endavant deixen una ranura entre l'*slat* i l'ala, que permet el pas d'una forta corrent d'aire i així permet a l'ala augmentar l'angle d'atac sense entrar en pèrdua. (fig.2)

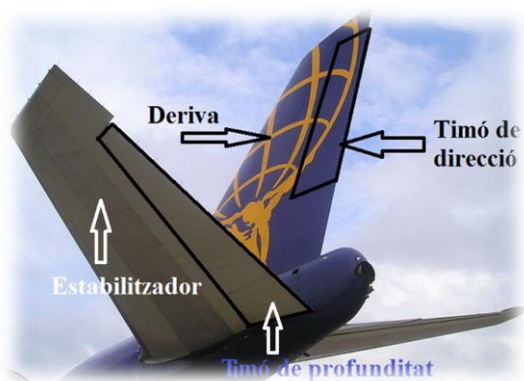


(fig.3)⁶ Parts de l'ala

Spoilers, aerofrens: Són destructors de la sustentació. Estan situats a la part central de l'ala. Són els encarregats de destruir la sustentació d'una petita porció de l'ala; d'aquesta manera l'avió guanya velocitat de descens sense guanyar velocitat horitzontal. A més, generen molta resistència aerodinàmica.(fig.3)

2.2.2-L'empanatge

L'empanatge és l'encarregat de mantenir les ales encarades al flux d'aire, ja que per si soles són extremadament inestables. Per dir-ho d'una altra manera, són com un gallet.(fig.4) Es pot distingir entre estabilitzador i deriva:



(fig.4)⁷ Parts de l'empanatge

L'estabilitzador, és l'encarregat de mantenir l'estabilitat en l'eix vertical, porta integrat el timó de profunditat que al pujar-lo crea una sustentació negativa que fa caure la cua i augmenta l'angle d'atac de les ales per la qual cosa aquestes creen més sustentació i per tant, l'avió puja; o, per altra banda, baixant-lo, crea sustentació positiva, que fa pujar la cua i disminueix l'angle d'atac de les ales, d'aquesta manera, generen menys sustentació i l'avió baixa.

La deriva, manté l'estabilitat en l'eix horitzontal, porta integrat el timó de direcció que, girant-lo cap a una banda o cap a l'altra, genera sustentació horitzontal i així permet girar horitzontalment.

⁶ Fotografia extreta de la web airliners.net

⁷ Ídem.

2.2.3-El fuselatge

El fuselatge és l'encarregat de mantenir les ales i l'estabilitzador units amb les seves corresponents incidències correctes. També s'hi poden trobar elements com la cabina, el compartiment de càrrega, el motor (en cas de monomotors, si són multi motors estan a les ales), el tren d'aterratge, etc.

2.2.4-El motor

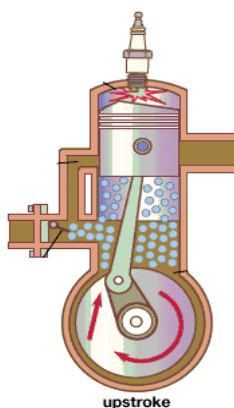


El motor que he utilitzat per propulsar aquest avió és un motor de combustió interna de 2 temps, amb una potència de 1,2 cv i un cubicatge de 6.5 cc.(fig.5)

Utilitza un combustible anomenat *glow* que està compost per un 5% de nitrometà, un 20% d'oli sintètic i un 75 % de metanol.

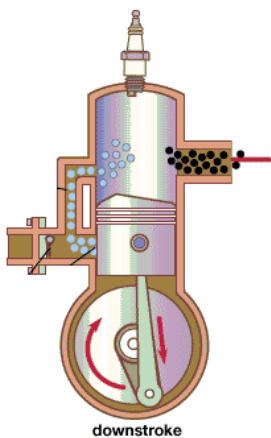
(Fig.5)⁸ Motor.

Els motors de dos temps funcionen de la següent manera:



1r temps (*upstroke*): el combustible entra al carburador i es barreja amb aire degut a l'efecte de succió que provoca el pistó, aquesta mescla entra al cilindre al mateix temps que el gas de l'anterior procés en surt, en aquest gènere de motors surt una petita part de la barreja de combustible mesclada amb els gasos d'expulsió, fet que redueix el seu rendiment; finalment, el pistó puja i comprimeix la mescla.(fig.6)

(Fig.6)⁹ Moviment *upstroke*



2n temps (*downstroke*): el gas comprimit augmenta de temperatura i a l'entrar en contacte amb el filament incandescent de la bugia, s'inflama. A l'inflamar-se es produeix una reacció química i el gas augmenta de volum. Aquest, a tanta pressió, empeny el pistó fins que arriba al nivell on hi ha els orificis d'expulsió de gasos i hi surt de manera que succiona el combustible del carburador.(Fig.7)

(Fig.7)¹⁰ Moviment *downstroke*

⁸ Fotografia extreta de la web supertigre.com

⁹ Fotografia extreta de la web picses.eu

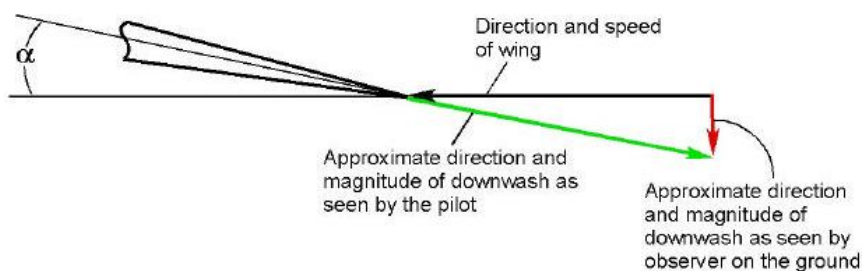
¹⁰ Idem.

Aquest procés es repeteix, en el motor a ralenti, aproximadament unes 50 vegades cada segon; amb el motor a màximes revolucions, recomanades pel fabricant, unes 300 vegades cada segon.

2.3-Física del vol¹¹

2.3.1-El vol d'un avió està regit per moltes lleis físiques.

Començaré parlant de la sustentació: La sustentació és la força que contraresta la força de la gravetat. Aquesta força la genera les ales. Per poder entendre-la i conèixer la seva formació hem de recordar la primera i la tercera llei de Newton: la primera ens diu que un cos en repòs tendirà a continuar en repòs, i un cos en moviment continuarà movent-se fins que hi actui una força externa; la tercera ens diu que cada acció té una reacció igual i oposada. Per tant, per poder generar sustentació l'ala ha de fer alguna cosa a l'aire en direcció oposada a la sustentació. Així que, si la sustentació té sentit positiu en l'eix Y, l'ala ha de desplaçar aire en sentit oposat, en sentit negatiu en l'eix Y, aquesta massa d'aire s'anomena *downwash*. D'aquesta manera podem deduir que els avions volen degut a l'aire que les seves ales desplacen cap a baix o el que és el mateix, volen generant el suficient *downwash* com per contrarestar la gravetat. Així podem dir que la sustentació és la massa d'aire per la velocitat vertical de la mateixa. L'ala, per augmentar la seva sustentació ha d'incrementar el seu angle d'atac mantenint la mateixa velocitat, o augmentar la velocitat mantenint l'angle d'atac.(fig.8)



(Fig.8)¹² descomposició del *downwash*

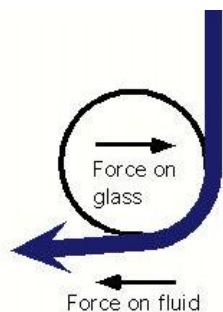
Per poder demostrar aquesta teoria es podria fer el següent experiment:
En el cas hipotètic que existís una balança prou gran si un avió hi volés per damunt, a baixa altura, la balança enregistraria el pes exacte del mateix.

¹¹ La informació d'aquest apartat la he extret de la web www.allstar.fiu.edu/aero/ després que un pilot d'avió privat em verificués la seva veracitat.

¹² ANDERSON, David: *Why airplanes do fly?*

Per generar la sustentació necessària per poder volar, els avions han de desplaçar molt d'aire: si calculéssim el component vertical del *downwash* d'una *Cessna 172* volant a 110 nusos, seria de 9 nusos. Per generar els 1.000 Kg que pesa l'avió ens donaria que ha de desplaçar la increïble quantitat de 2,5 tones d'aire per segon. De totes maneres, aquesta dada pot estar subestimada ja que no es té en compte l'*upwash*, que és l'aire que les ales generen en sentit positiu de l'eix Y, que es forma a l'extrem d'atac.

I sabent això, la gent es pregunta, com és que les ales desplacen aire cap a baix? La resposta és que tots els fluïts tenen, en major o menor mesura, una certa viscositat. Quan un fluït en moviment entra en contacte amb la superfície d'un objecte, aquest intenta seguir-la. Això es pot demostrar si apropem un got cilíndric al xorro d'aigua d'una aixeta, al primer contacte entre l'aigua i el got, l'aigua, enlloc de continuar caient seguirà el contorn del got tal i com es veu a la figura 9. Aquest efecte es diu efecte *coanda*.

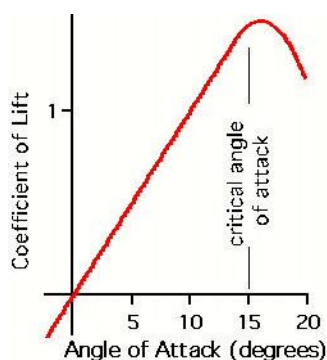


(Fig.9)¹³ Efecte coanda.

La viscositat de l'aire és molt petita, però suficient com perquè les molècules d'aire s'adhereixin a la superfície de l'ala. La velocitat relativa entre les molècules d'aire més pròximes a la superfície de l'ala és zero (per això la pols dels cotxes no marxa) i va augmentant a mesura que es separen de l'ala, arribant a la major velocitat a uns 2 cm de l'ala.

Degut a la superfície corba de la part superior de les ales, les molècules la segueixen i així es forma el *downwash*. A part de la curvatura de l'ala, també influeix en la formació de *downwash* l'angle d'atac de l'ala. A major angle d'atac major és la velocitat del component vertical del *downwash* però també major resistència aerodinàmica genera.

Com tot, aquest angle té un límit, això és degut a que si augmentem massa aquest angle, arriba un moment en que la viscositat de l'aire és insuficient per poder resseguir el contorn de l'ala i es trenca amb la consegüent pèrdua sobtada de sustentació. (figura 10)



(Fig.10)¹⁴ Gràfic angle d'atac- sustentació

¹³ ANDERSON, David: *Why airplanes do fly?*

¹⁴ Ídem

En aquesta gràfica s'observa la relació entre el coeficient de sustentació i l'angle d'atac. A partir de 15° , comença a perdre sustentació i a uns 19° simplement desapareix i l'avió cau com una pedra.

2.3.2-La sustentació requereix potència.

La potència necessària per a que un avió es sustenti és proporcional al seu pes per la velocitat vertical de l'aire. Aquí entra la primera llei de Newton. Si un avió travessa una massa d'aire en repòs, un cop ja l'ha passada aquest aire estarà en moviment, d'aquesta manera se li ha donat energia, és a dir, si volem sustentar un avió hem de donar energia a l'aire, per la qual cosa hem d'aplicar energia a l'avió per tal que ell la pugui donar a l'aire. Aquesta energia prové del motor, o de la gravetat i de les tèrmiques, en el cas dels planadors. Si dupliquem la velocitat de l'avió també es duplicarà la sustentació, per mantenir la sustentació necessària, s'haurà de disminuir l'angle d'atac amb la consegüent disminució de la resistència aerodinàmica i la potència necessària per mantenir la velocitat. Però, això passa a la vida real? No, tots sabem que per augmentar la velocitat s'ha d'augmentar la potència. Això és degut a l'augment al quadrat de la resistència paràsit.

2.3.3-Resistències aerodinàmiques:

Hi ha dos tipus de resistències aerodinàmiques: La induïda i la paràsit. La resistència aerodinàmica induïda és aquella resistència que generen els vòrtex als extrems de les ales. Aquests vòrtex es formen degut a que l'aire a alta pressió de l'intradós de l'ala puja cap a l'extradós (Fig.11). Aquesta formació de vòrtex redueix notablement el rendiment alar i genera una alta resistència aerodinàmica a baixes velocitats i va reduint-se a mesura que la velocitat augmenta. Per evitar la formació de vòrtex s'instal·len uns elements anomenats *winglets*, que no són més que unes terminacions verticals als extrems de les ales, es poden observar a la majoria d'avions comercials. L'augment de la resistència aerodinàmica i la reducció del rendiment alar no són els únics problemes dels vòrtex, Aquests, durant les aproximacions als aterratges i durant els enlairaments poden durar a la pista durant minuts i poden causar accidents si hi passa algun altre avió.

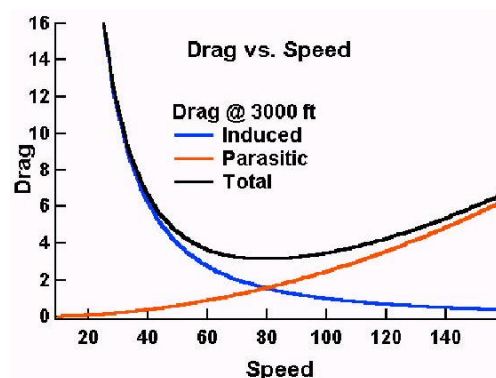
A més a més d'aquesta també hi ha les resistències paràsites: són aquelles que es formen degut a la textura dels materials amb el que està entelat l'avió. Hi ha avions com les maquetes que intenten simular l'entelat original de l'avió real, que moltes vegades era de tela, per tant és rugós, en canvi en el meu projecte utilitzaré un entelat de plàstic termoretràctil, que és completament llis. També hi ha la resistència que genera el motor sense carenar, el tren d'aterratge en cas que sigui fixa, les antenes, etc.



(Fig.11)¹⁵ Vòrtex

A la figura 11 es poden observar els vòrtex als extrems de les ales, són visibles degut a la condensació de la humitat. També es pot observar la distribució de la sustentació al llarg de la planta alar, fixe'u-vos que es fa més petita a mesura que s'apropa als extrems de l'ala; això és degut a la disminució del rendiment que provoca el vòrtex.

La suma d'aquestes dues resistències dóna com a resultat un gràfic de forma còncaua ja que a baixes velocitats hi ha molta resistència induïda i a altes velocitats n'hi ha de paràsit (fig. 12).



(Figura 12)¹⁶. Es pot observar la gràfica resistència-velocitat.

¹⁵ Imatge extreta de la web airliners.com

¹⁶ ANDERSON, David: *¿Why airplanes do fly?*

3-Disseny Construcció i vol d'una aeronau no tripulada

3.1-Disseny de l'avió.

Com que ja disposava d'un motor de combustió interna d'aeromodelisme i el tema econòmic del treball era delicat, vaig decidir utilitzar-lo. Tot seguit vaig parlar amb diverses persones per escollir la millor classe d'avió per construir; després de comparar diferents gèneres, em vaig decidir per un motoveler.

Un motoveler és un gènere d'avió que utilitza un motor de combustió interna o elèctric per enlairar-se i arribar a una certa alçada, en aquest període l'aparell es considera un avió a motor; és en aquest moment quan el motor es para i l'hèlice es plega per passar al mode veler. Un veler utilitza les corrents ascendents de masses d'aire per guanyar energia potencial o cinètica, al gust del pilot.

Les corrents ascendents es poden causar de dos maneres:

- Hi ha zones de terreny que absorbeixen més radiació solar que d'altres de manera que s'escalfen més, aquesta escalfor passa a l'aire més pròxim del terra. Al ser més lleuger que l'aire fred, l'aire escalfat ascendeix en forma de remolí. Aquest tipus de vol es diu vol en tèrmica.
- A les muntanyes o parets verticals artificials: l'aire, al xocar contra una de les seves vessants puja cap amunt per tal de continuar fluint. La zona on l'aire ascendeix és la que s'utilitza per aconseguir més energia potencial o cinètica. Aquest tipus de vol es diu vol de vessant.

Degut a que ja disposava d'una planta motora abans de tenir el disseny de l'avió, em vaig veure obligat a començar per la meitat, per l'estimació del pes màxim i així poder calcular les dimensions de la planta alar.

3.1.1-Estimació del pes final

Per poder calcular la superfície alar he agut de buscar el pes del motor, dels components electrònics i estimar el pes de l'estructura; es a dir, he de fer una predicció del pes final de l'avió per poder dimensionar adequadament les ales.

El motor pesa 350 g i el tub d'escapament més o menys 200, per tant el grup propulsor pesa 550 g. Cada servomotor que utilitzaré pel control del carburador, el timó elevador i el timó de direcció pesen 40 g per tant tots tres en pesen 126; aquests servos tenen un parell de 35 newtons/centímetre. Els servomotors que mouran els alerons pesen 10 g cada un, per tant 20; aquests servos tenen un parell de 16 newtons/centímetre. El receptor pesa uns 16 g. Per acabar, la bateria pesa 100 g.

El pes total de l'electrònica i del motor és de 812 g. Però també hem d'afegir els cables que passaran per l'interior de les ales, els allargadors, etc. D'aquesta manera el pes real de l'equip de ràdio control serà d'uns 950 g. S'ha de calcular el pes de l'avió en buit, és a dir, solament l'estructura; per experiència pròpia i pel pes que donen fabricants d'avions similars, deurà pesar uns 2.550 g. D'aquesta manera l'aproximació del pes final de l'aeromodel, sense combustible, és de 3.500 g.

Motor	Servos	Receptor	Bateria	Estructura	Pes total
550g	146g	16g	100g	2550g	3500g

Taula 1. Estimació del pes.

3.1.2-Càlcul de la superfície alar

El càlcul de la superfície alar determina, juntament amb el perfil alar, la velocitat, l'agilitat i, sobretot, que l'avió pugui volar. Per començar, s'ha de buscar la càrrega alar¹⁷. que necessitem per que sigui un planejador amb un per de 3500 g, a continuació s'ha de buscar la corda mitja i la longitud de les ales per aconseguir l'àrea de les ales, i per acabar, s'ha d'aplicar conicitat per tal de millorar el rendiment del disseny.

Per motovelers, la càrrega alar ha d'estar entre 35 i 45g/dm². Per tant, si el pes de l'avió és de 3500 g:

¹⁷ La càrrega alar és el pes que ha de suportar cada dm² de la superfície de l'ala.

$$\frac{3500g}{40g/dm^2} = 87.5dm^2$$

Per comprovar que la càrrega alar és correcta utilitzaré aquesta fórmula:

$$C = \frac{Ca}{\sqrt{s}}$$

On: C és un coeficient. I pot ser:

2-3 per un veler pur

4-5 per un motoveler

Ca és la càrrega alar.

6-8 per un entrenador

s és la superfície ala

9-12 per avions acrobàtics

Per tant:

$$C = \frac{40}{\sqrt{87,5}}$$

$$C = 4.27$$

$C < 5$ i $C > 4$ Així doncs la càrrega alar és correcta.

Hi ha infinites combinacions entre corda mitja¹⁸ i longitud per tal d'aconseguir la superfície alar de 87,5 dm². Ja que ha de ser un motoveler, ha de tenir un allargament¹⁹ entre 11 i 15.

Així que he d'utilitzar aquesta fórmula:

$$A = \frac{L}{C}$$

On A és l'allargament.

L és la longitud.

C és la corda alar mitja.

Per facilitar els càlculs faré una ala completament rectangular i després ja li aplicaré una certa conicitat²⁰ per augmentar el rendiment.

$$A = \frac{3000}{290}$$

3000x290= 87dm² Així que:

A= 10 10<11 per tant he de buscar una relació amb més longitud i menys corda.

$$A = \frac{3400}{260}$$

3400x260=88dm² Així doncs:

¹⁸ La corda mitja és l'amplada mitja de l'ala.

¹⁹ L'allargament és el resultat de la longitud partida entre la corda alar mitja; s'utilitza per determinar l'estil de vol de l'avió.

²⁰ La conicitat consisteix en augmentar la corda arrel i disminuir la corda extrem, conservant la mateixa corda mitja.

13>10 aquest allargament és correcte.

He de dir que les mesures sempre són aproximades i que intentaré aconseguir mesures exactes, sense decimals, ja que en el moment de la construcció, si hi ha mesures amb decimals es complica i a més al ser fet a mà, mai queda exacte.

Finalment el perfil alar encarregat de generar la sustentació que he escollit és el *clark-y*, un perfil molt conegut gràcies a les seves propietats de vol lent i un gran generador de sustentació (fig.1.1)

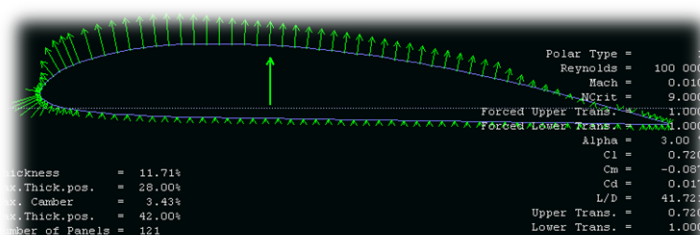


Fig.1.1²¹ Perfil *Clark-y*

A la figura 1.1 es mostra el perfil alar escollit, el *clark-y*, es pot observar la distribució de les pressions en forma de petits vectors verds al contorn del perfil; a més, es mostra la força total del perfil i el seu punt d'aplicació en forma d'un vector verd gran.

Fins aquí ja tenim les ales dissenyades (fig.1.2)

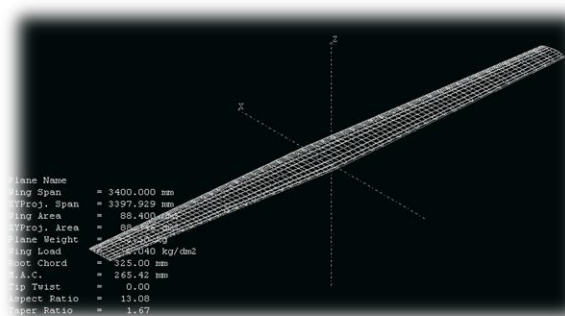


Fig.1.2²² Planta alar dissenyada.

Corda	longitud
260mm	3400mm

Taula 2. Corda i longitud de la planta alar.

²¹ Propietat de l'autor

²² ²³ Ídem

3.1.3-Empanatge

Primer he de calcular una distància aproximada entre l'ala i l'estabilitzador:

Aquesta distància ha de ser més o menys 3 vegades la corda alar mitja. Això no ho demostra cap fórmula matemàtica en aerodinàmica sinó que és fruit de l'optimització entre el pes i la distància respecte l'ala de l'estabilitzador:

Si és més curt, l'estabilitzador ha de ser més gran, per tant pesarà més i si és més llarg, haurà de ser més petit i per tant pesarà menys. Però si és massa llarg, els cables de control, que també pesen, hauran de ser més llargs i també hi influirà notablement la llei de la palanca.

$$3 \times \text{Corda} = \text{distància}$$

$$\text{Així que: } 3 \times 260 = 780 \text{ mm}$$

Però per a simplificar la construcció i futurs càlculs ho deixaré en 750 mm.

Ara que sabem aquesta distància he de calcular el tamany de l'estabilitzador:

Primer he de calcular la distància del centre de pressions de l'ala, que normalment està a un 25% de l'extrem d'atac, i l'extrem d'atac de l'estabilitzador:

Distància de l'empanatge al centre de pressions = 75% de la Corda + distància de la cua

$$D = 75 \% \text{ de } 260 + 750 \quad D = 945 \text{ mm}$$

Per poder continuar amb el càlcul he de decidir la corda de l'estabilitzador ja que les fórmules em donen el resultat de la superfície sempre i quan la distància entre ales i estabilitzador siguin respecte el seu centre de pressions.

De moment agafo una corda de 220 mm:

$$25\% \text{ de } 220 = 55 \text{ mm}$$

Aquesta distància l'he de sumar a la distància entre el centre de pressions de l'ala i l'extrem d'atac de l'estabilitzador.

$$55 + 945 = 1000 \text{ mm}$$

1000 mm és la distància entre els centres de pressions de l'ala i l'empanatge.

Per calcular les dimensions de l'estabilitzador utilitzaré la següent fórmula:

$$CVe = \frac{(se \times d)}{(sa \times c)}$$

On: CVe és el coeficient de volum de l'estabilitzador.

se és la superfície de l'estabilitzador.

d és la distància entre els centre de pressions de les ales i l'estabilitzador.

sa és la superfície de l'ala.

c és la corda alar mitja.

Els valors de C_{Ve} estaran entre 0.4 i 0.7 per un veler. I un 0.4 a un 0.6 per avions normals. Els valors baixos faran que l'avió sigui més maniobrable i els més alts, més nobles. Crec que per les qualitats de vol que estic buscant, amb un 0,6 anirà bé.

$$0.6 = \frac{(se \times 1000)}{(87.5 \times 260)}$$

$$(0.6 \times 87.5 \times 260)/1000 = se \quad se = 13,6 \text{ dm}^2$$

Com que ja havia escollit la corda mitja, que es 220 mm:

$$1360 = 22 \times L \quad L = 1360/22 \quad L = 61.8$$

Per facilitar la construcció ho deixaré en 600 mm. Ho he decidit així ja que al principi ja he escollit un valor de C_{Ve} alt i si disminueix 0.019, no em donarà problemes.

Continuaré amb el disseny de la deriva:

Per trobar la superfície de la deriva s'utilitza la mateixa fórmula que l'empenatge, però en aquest cas, el valor de C_{Ve} ha d'estar entre 0.03 i 0.06 per a un planejador; degut a que no ha d'estabilitzar l'ala, només ha de contrarestar el moment de morro i fer una mica d'efecte veleta per encarar el perfil alar a la corrent d'aire. També es important recordar que el valor "c" s'ha substituït per un valor "e", que és la semienvergadura de l'ala. En aquesta fórmula s'ha de tenir en compte que la superfície que ens dona inclou la part de fuselatge que hi ha sota la deriva. He escollit un valor de C_{Vd} de 0.05 ja que el fuselatge el penso fer amb un tub de fibra de carboni cònic, per tant, la superfície que hi haurà per sota la deriva serà mínima i no actuarà com a tal.

$$C_{ve} = \frac{(sd \times d)}{(sa \times e)}$$

$$0.05 = (sd \times 1000)/(87.5 \times 1700) \quad sd = 0.05 \times 87.5 \times 1700 / 1000 \quad \text{Així que: } sd = 7.43 \text{ dm}^2$$

Així que tindrà un format de 300x250 mm, que ens dona una superfície de 7.5 dm².

Element:	estabilitzador	deriva
Longitud:	600mm	300mm
Corda:	220mm	250mm

Taula 3. Tamany de l'estabilitzador i de la deriva

En aquest punt del disseny de la planta alar i dels empenatges, tenim unes ales i un empenatge completament rectangulars, que per conseqüència, són molt poc eficients ja que

l'aire a alta pressió que tenim a l'intradós²³, a les puntes de les ales, passa a l'extradós²⁴, aquest fet augmenta la resistència aerodinàmica induïda i disminueix el rendiment de les ales a mesura que ens acostem als extrems.

Per evitar aquests problemes, s'ha d'aplicar el que se'n diu conicitat:

3.1.4-Conicitat:

La conicitat consisteix en augmentar la corda central i disminuir la dels extrems de les ales de manera que la corda mitja, la superfície total i el centre de pressions es mantingui.

Per dur a terme aquest canvi s'utilitza la següent fórmula:

$$V = (C_m - C_m \times c) / (1 - c)$$

On: V és la variació de la corda.

C_m és la corda mitja

c és la conicitat

La conicitat ha de ser un nombre entre 0, per acabar l'ala en punxa, i 1, per ser completament rectangular.

Ales:

Per les ales he triat una conicitat de 0.6.

$$V = (260 - 260 \times 0.6) / (1 - 0.6) \quad V = 65 \text{ mm}$$

Si apliquem aquesta variació ens queda:

$$\text{Per l'extrem: } 260 - 65 = 195 \text{ mm} \quad \text{Pel centre: } 260 + 65 = 325 \text{ mm}$$

S'ha de tenir present que si no volem haver de tornar a calcular l'empanatge, s'ha de mantenir la posició del centre de pressions. Així que hem de calcular el 25% de la corda màxima i la mínima i alinear-les.

$$25\% \text{ de } 325 = 81 \text{ mm} \quad 25\% \text{ de } 195 = 49 \text{ mm}$$

Hem de fer el mateix amb l'estabilitzador i la deriva, però sense buscar el centre de pressions perquè sinó es complica molt la seva construcció i la variació és mínima.

Estabilitzador:

²³ Intradós: part inferior d'un perfil alar.

²⁴ Extradós: part superior d'un perfil alar.

$$V = (220 - 220 \times 0.6) / (1 + 0.6) \quad V = 55 \text{ mm}$$

$$\text{Extrem: } 220 - 55 = 165 \text{ mm} \quad \text{Centre: } 220 + 55 = 275 \text{ mm}$$

Deriva:

$$V = (250 - 250 \times 0.6) / (1 + 0.6)$$

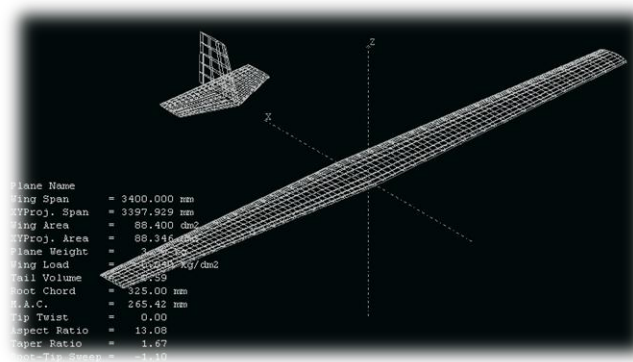
$V = 62 \text{ mm}$ però ho deixaré en 60 mm per simplificar la construcció.

$$\text{Extrem: } 250 - 60 = 190 \text{ mm} \quad \text{Base: } 250 + 60 = 310 \text{ mm}$$

Element:	estabilitzador	deriva	ales
Longitud:	600mm	300mm	3400mm
Corda central:	275mm	310mm	325mm
Corda extrem:	165mm	190mm	195mm

Taula 4. Tamanyes després d'aplicar la conicitat.

Ara ja tenim les ales i l'empanatge dissenyats (fig.1.3)



(Fig.1.3)²⁵ Ales i empanatge ja dissenyats.

²⁵ Propietat de l'autor

3.1.5-Superfícies de control:

Les superfícies de control permetran dirigir i maniobrar l'avió. Es pot distingir entre alerons, timó de direcció i timó de profunditat.

Alerons:

Els alerons solen tenir entre un 10 i un 15 % de la superfície alar de totes les combinacions possibles; he escollit un aleró a cada ala amb el 10% de la semi superfície alar i ja que estic buscant un rendiment òptim dins del possible, els alerons no arribaran a l'extrem de l'ala ja que si no, la formació de vòrtex es multiplica.

Per tant: Si la semi superfície alar és de 43,75 dm² el 10% serà 4,37 dm² de cada aleró. Per augmentar l'efecte palanca i intentar reduir la resistència paràsita en cada gir, l'aleró es situarà a una distància de 15 cm de l'extrem de l'ala, tindrà una llargada de 85 cm i una corda de 5,1 cm, que ens dona com a resultat una superfície de 4,33 dm².

Timó de profunditat:

La superfície del timó de profunditat oscil·la entre un 20 i un 35 % de la superfície de l'estabilitzador. Jo he triat un 29 % ja que necessito que sigui molt efectiu a baixa velocitat però tampoc necessito fer acrobàcia.

$$29 \% \text{ de } 13,2 \text{ dm}^2 = 3,8 \text{ dm}^2$$

Per simplificar el procés de construcció, el timó de profunditat ocuparà tota l'envergadura de l'estabilitzador:

$$60 \text{ cm} \times 6 \text{ cm} = 3,6 \text{ dm}^2$$

Deriva

La superfície del timó de direcció oscil·la entre el 25 i el 45 % de la superfície de la deriva. Jo he triat un 35 % ja que és el terme promig i s'ajusta a les característiques que estic buscant.

$$35 \% \text{ de } 7,5 \text{ dm}^2 = 2,6 \text{ dm}^2$$

Tal i com he fet amb el timó de profunditat, el timó de direcció ocuparà tota l'alçada de la deriva:

$$30 \text{ cm} \times 8,5 \text{ cm} = 2,55 \text{ dm}^2$$

Element	Deriva	alerons	Timó de profunditat
Longitud	300mm	850mm	600mm
Corda	85mm	51mm	60mm

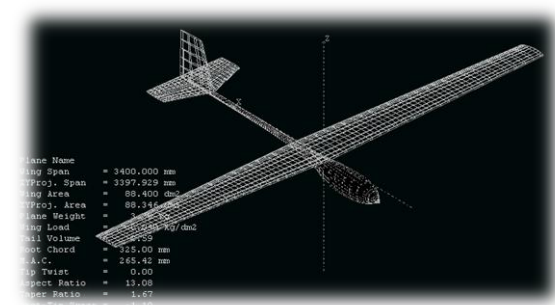
Taula 5. Tamany de les superfícies de control.

3.1.6- Fuselatge:

En aquest punt ja tenim els elements més importants de l'avió, però estan separats, s'han d'unir mitjançant el fuselatge.

Necessito un fuselatge lleuger, fàcil de construir, amb la mínima resistència aerodinàmica possible i molt resistent. Aquestes característiques les podem aconseguir amb moltes combinacions possibles, però la millor, des del meu punt de vista, és una cabina on s'ubiquin els elements elèctrics, amb un morro on hi pugui entrar el motor i una cua feta a partir d'un tub de fibra de carboni, és resistent, lleugera i molt fàcil i ràpida d'instal·lar.

Ara, ja tenim les ales, l'empanatge i el fuselatge dissenyats (fig.1.4)

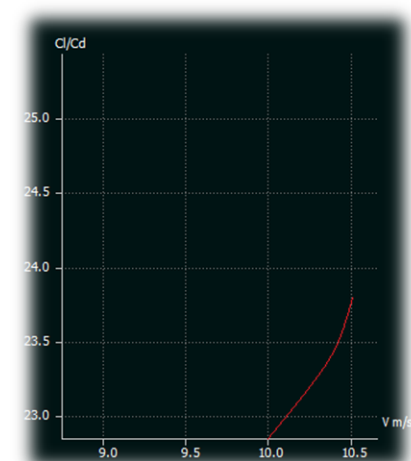


Disseny de l'avió finalitzat. A falta d'analitzar les seves propietats aerodinàmiques.

(Fig.1.4)²⁶

3.1.7- Càlcul d'actuacions:

El càlcul d'actuacions em permetrà fer una predicció de les característiques de vol de l'avió.



Per començar necessitaré la finesa màxima, per trobar-la he utilitzat el programa *XFLR5*. En aquesta gràfica (fig. 2.1) (finesa - velocitat) es mostra la finesa màxima del disseny. Aquesta finesa, és de 23,56 a una velocitat de 10,5 m/s.

(Fig. 2.1)²⁷ Gràfic Finesa-velocitat.

²⁶ Propietat de l'autor

²⁷ Propietat de l'autor



També necessitaré la resistència aerodinàmica: La resistència aerodinàmica (CD) és de 0,027.(fig. 2.2)

(fig.2.2)²⁸ Característiques aerodinàmiques

3.1.7.1-Velocitat màxima:

Lògicament, el millor amic de la velocitat és la potència i el major enemic és ella mateixa.

Aquesta enemistat és deguda a que la resistència aerodinàmica creix al quadrat de la velocitat.

Per poder calcular la velocitat màxima, primer he de trobar la potència màxima disponible en Cv: segons el fabricant, el motor pot entregar 1,2 hp de potència; però a la realitat l'hèlice, degut al seu petit tamany, té un rendiment del 50 al 55 %. Per tant, dispo de una potència útil de 0,6 Cv.

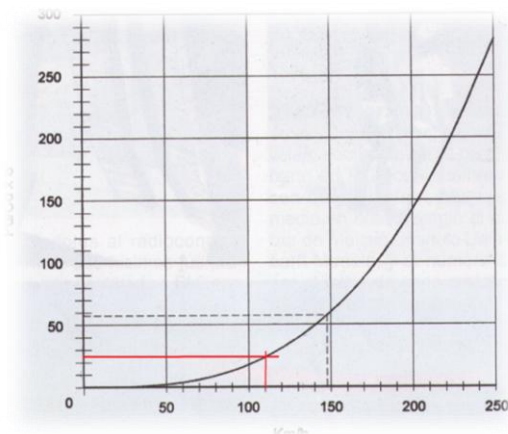
Tot seguit, he de calcular $C_d \cdot S$; C_d és el valor de la resistència aerodinàmica i S la superfície alar total en m^2 .

$$C_d = 0,027 \quad S = 0,875 \text{ m}^2$$

$$0,027 \cdot 0,875 = 0,023625$$

A continuació he de calcular $P_d / (C_d \cdot S)$

$$P_d = 0,6 \quad C_d/S = 0,023625 \quad 0,6/0,023625 = 25.39$$



Tot seguit, amb aquesta gràfica (fig. 2.3) es troba la velocitat màxima, que és 110 km/h (línies en vermell)

(fig. 2.3)²⁹ Gràfic per trobar la velocitat.

²⁸ Ídem

²⁹ Publicació RCmodel Aero nº64

3.1.7.2- La velocitat de pèrdua.

Realment s'hauria de dir "velocitat que correspon a l'angle d'entrada en pèrdua"; aquesta velocitat és la velocitat mínima en que pot volar un avió. És molt important ja que a l'hora de l'aterratge si la velocitat mínima és massa elevada, ens podem passar les pista sense adonar-nos, o fins i tot, que l'avió s'estavelli degut a la poca experiència del pilot. Si aquesta velocitat em surt massa elevada, hauré de repetir tot el disseny.

Per calcular la velocitat de pèrdua, primer necessitaré el C_{Lmax} , o coeficient de sustentació màxima:

80

DRAG ESTIMATION

[2-2

required of the wing for stall. A conventional two-wheel landing gear raises the forward part of the airplane to an excessive height in order to permit the airplane to stall before the tail wheel contacts the ground.

Designation	Diagram	$C_{L_{\max}}$	α at $C_{L_{\max}}$ (degrees)	L/D at $C_{L_{\max}}$	$C_{m_{ac}}$	Reference NACA
Basic airfoil Clark Y		1.29	15	7.5	-.085	TN 459

(fig.2.4)³⁰ Característiques del perfil Clark-y

Segons aquest document el C_{Lmax} és de 1,29.(fig. 2.4)

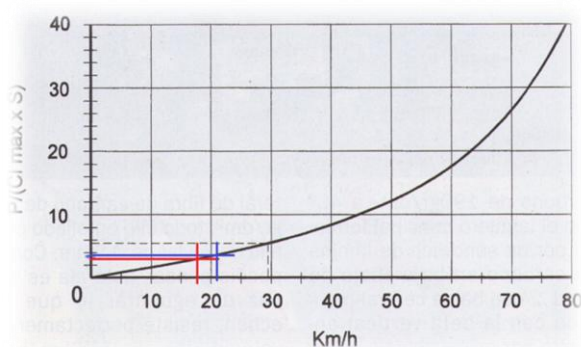
Tot seguit, he de calcular $P/(C_{Lmax} \cdot S)$, on P és el pes en kg i S la superfície alar en m².

Primer faré el càlcul amb el pes estimat i a continuació, per si he sigut massa optimista, ho faré afegint-li 500 gr. més.

$$3,5/(1,29 \cdot 0,875) = 3,1$$

$$(3,5+0,5)/(1,29 \cdot 0,875) = 3,54$$

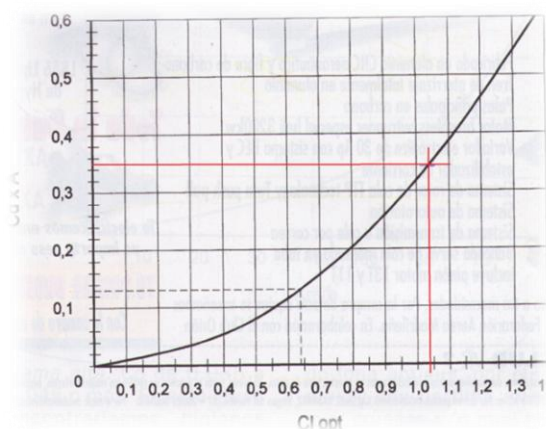
A continuació, si substitueixo aquests valors a la gràfica 2.5 obtinc la velocitat de pèrdua en km/h.



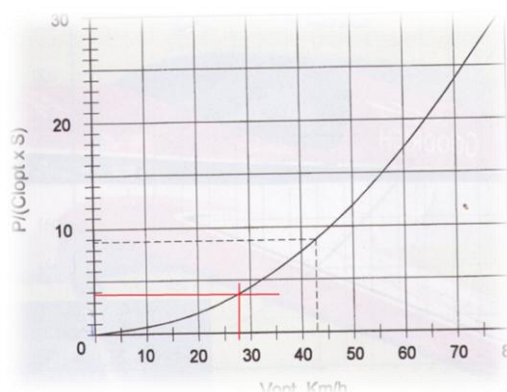
(fig. 2.5)³¹ Gràfic per trobar la velocitat de pèrdua

³⁰ Imatge extreta de la web .ww2aircraft.net.

Així, amb un pes de 3,5 kg, la velocitat de pèrdua és de 17 km/h i amb 4 kg de 21 km/h. No està malament.



(fig. 2.6)³² Gràfic per trobar el Cl òptim.



3.1.7.3-Velocitat ascensional.

Aquest estudi em permetrà saber la velocitat ascensional màxima i l'angle de vol al qual es troba. Primer necessitaré la finesa màxima, que és 23,56. A continuació he de calcular $C_d \cdot A$, on A és l'allargament: $0,027 \cdot 13 = 0,35$

Ara ho substituïm a la figura 2.6 per trobar el valor de Cl òptim, que és 1,04.

Tot seguit he de calcular $P/(Cl \cdot S)$ on P és el pes i S la superfície alar. $3,5/(1,04 \cdot 0,875) = 3,85$

Si substitueixo aquest resultat a la figura obtindré la velocitat de vol que proporciona la màxima velocitat ascensional. Aquesta velocitat serà de 27 km/h. (fig. 2.7)

(fig.2.7)³³ Gràfic per trobar la velocitat de vol que equival a la màxima velocitat ascensional.

Assumint que l'angle de pujada no serà massa gran, podem considerar que la sustentació és igual al pes. D'aquesta manera, $L/D = P/D$.

L/D és el valor de la finesa màxima del disseny i és 23,56 i " P " és el pes, 3,5 kg.

$$3,5/23,56 = 0,15 \text{ kg} = D$$

Tenim que $P \cdot 274 = T \cdot V$, $T \cdot V$ és el valor que m'interessa trobar, en kg-km/h, i P és la potència del motor, 0,6 Cv.

$$0,6 \cdot 274 = 164,4 = T \cdot V$$

Ara, he de calcular $R/C = ((T \cdot V) - (D \cdot V)) \cdot 0,08 / P$

R/C és "rate of climb", és a dir, taxa d'ascens, P és el pes i V la velocitat.

$$R/C = (164,4 - (0,15 \cdot 27)) \cdot 0,08 / 3,5$$

$$R/C = 3,67 \text{ m/s}$$

³¹ Publicació RCmodel Aero nº64.

³² Ídem

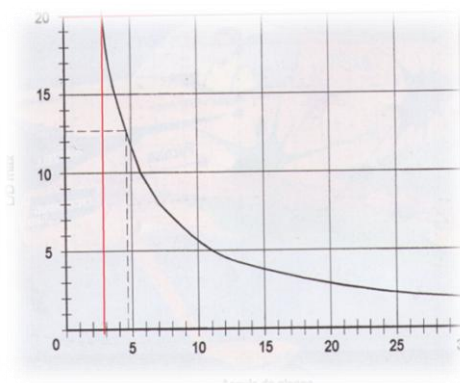
³³ Ídem

3.1.7.4-Prestacions de planeig.

Tots els avions amb el motor apagat són planadors, per tant, el pilot ha de saber prendre la millor decisió en cas d'averia del motor. A més el meu disseny, des del principi, l'he pensat per poder planejar i fins i tot guanyar altura amb les corrents d'aire calent, ara sabré fins a quin punt han estat encertades les decisions sobre l'aerodinàmica.

Les dades que m'interessen són l'angle de planejar i la velocitat de descens.

Primer he de començar, com sempre, sabent la finesa màxima, 23,56, però a motor parat, o

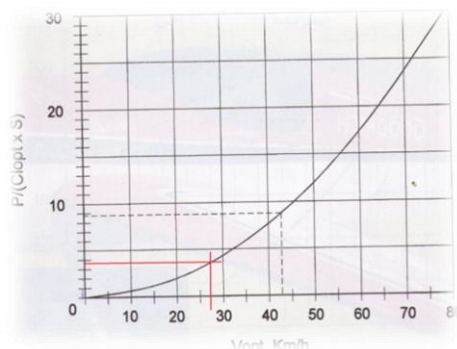


fins i tot a ralenti, l'hèlice enlloc de propulsar, es converteix en un fre, fet que augmenta la resistència aerodinàmica amb la consegüent disminució de la finesa màxima. Així, em quedaré amb una finesa de 20, encara que crec que sóc massa optimista.

En aquest moment, he de substituir la finesa, 20, a la figura 2.8.

Aquí es veu que l'angle de pla neix serà d'uns 3°. (fig.2.8)

(fig.2.8)³⁴ gràfic per trobar l'angle de planeig



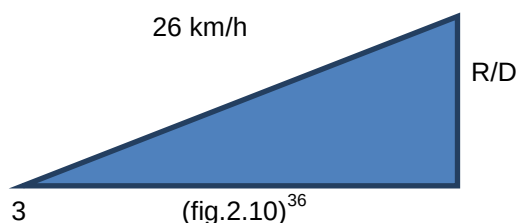
Ara he de rescatar de l'apartat del càlcul de velocitat ascensional màxima, el *Clopt*, que és 1,04. Sabent *Clopt*, calcularé $P/(Clopt \cdot S)$ i ho substituiré a la figura 2.9 per trobar la velocitat de planejar.

$$3,5/(1,04 \cdot 0,875) = 3,85$$

La velocitat òptima de pla neix serà de 26 km/h.

(fig.2.9)³⁵ Gràfic per trobar la velocitat de planeig.

Per calcular la velocitat vertical descendent (R/D), ho calcularé per trigonometria: (fig.2.10)



$$\sin 3 = (R/D)/7,22 \text{ m/s} \quad R/D = 0,38 \text{ m/s}$$

³⁴ Publicació RCmodel Aero nº64.

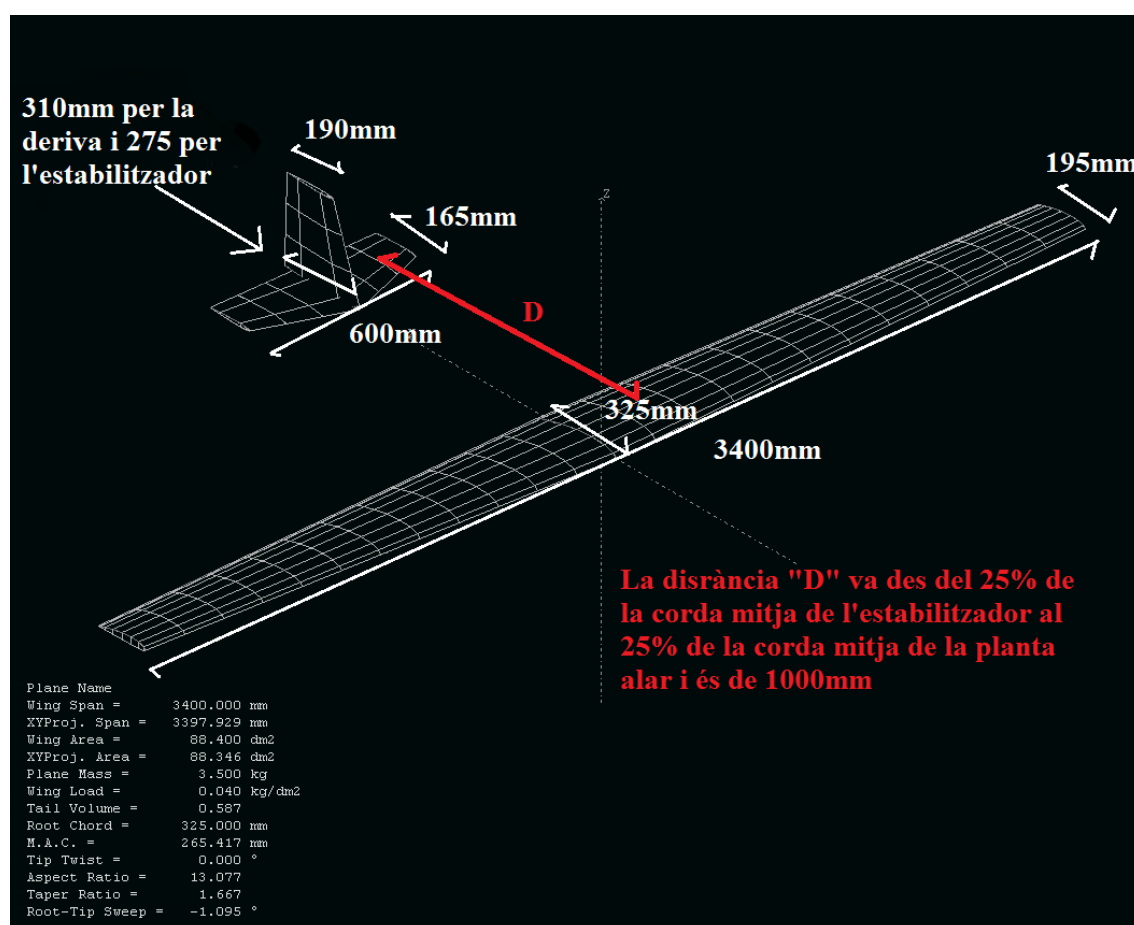
³⁵ Ídem

³⁶ Propietat de l'autor

Com es pot observar, no és un avió de competició però tampoc es pot demanar més.

Velocitat màxima:	Velocitat de pèrdua:	Velocitat ascensional:	Velocitat de planeix:	Velocitat de pèrdua d'altura en planeix:
110km/h	17km/h	3,67m/s	26km/h	0,38m/s

Taula 6. Es mostren les prediccions de les actuacions de l'avió.



(fig.2.10) Distàncies, longituds i cordes del disseny de l'avió acabat.

3.2-Construcció de l'avió

Aquesta és la part que més m'agrada, el treball de camp.

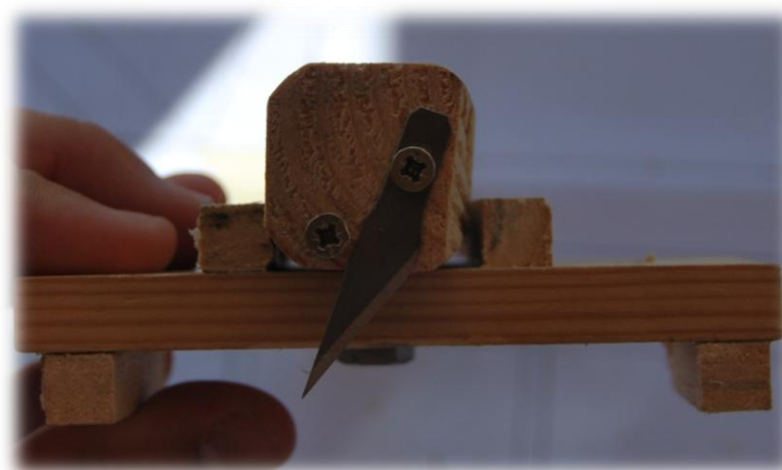
Primer he començat dibuixant el disseny en brut i posteriorment dibuixant-lo en format real en un paper per murals d'escoles ja que no trobava cap altra paper de la mida adequada. Per dibuixar el disseny he utilitzat tècniques i estris de dibuix tècnic i m'he guiat per l'experiència pel que fa a l'estructura interior dels elements i al gruix de les fustes. Per començar, he construït l'empanatge. Per no danyar el plànol, he calcat el dibuix en un altre full.

3.2.1 L'empanatge.

Comencem per la deriva: la deriva és l'encarregada de mantenir l'estabilitat longitudinal de l'avió. Per construir-la he utilitzat fusta de balsa, que és la que s'utilitza en aeromodelisme, però hi ha molts tipus de balsa diferents, uns són més durs i pesats i d'altres més tous i lleugers; per a la construcció tant de la deriva com de l'estabilitzador he utilitzat balsa de duresa mitja-forta ja que han de suportar grans esforços durant el vol. La balsa es ven en planxes de 1,5 m x 20 cm i 6 mm de gruix i encara que venen llistons ja tallats, he preferit tallar-los jo mateix ja que són notablement més cars.

Per poder tallar la planxa, en llistons de diferent tamany, me les he hagut d'enginyar per construir una màquina regulable per tallar llistons ja que les comercials són molt cares.

A la figura 3.1 es mostren els detalls d'aquesta màquina.

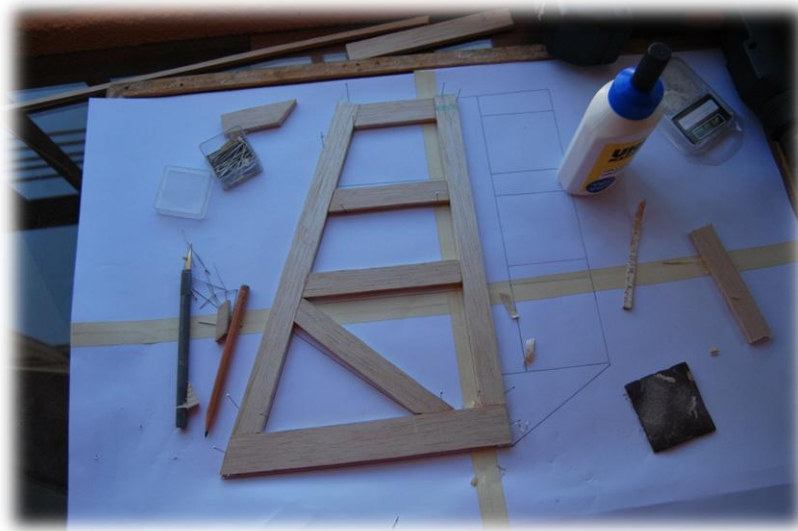


(fig.3.1)³⁷ Eina talla-llistons.

³⁷ Totes les imatges d'aquest apartat són propietat de l'autor.

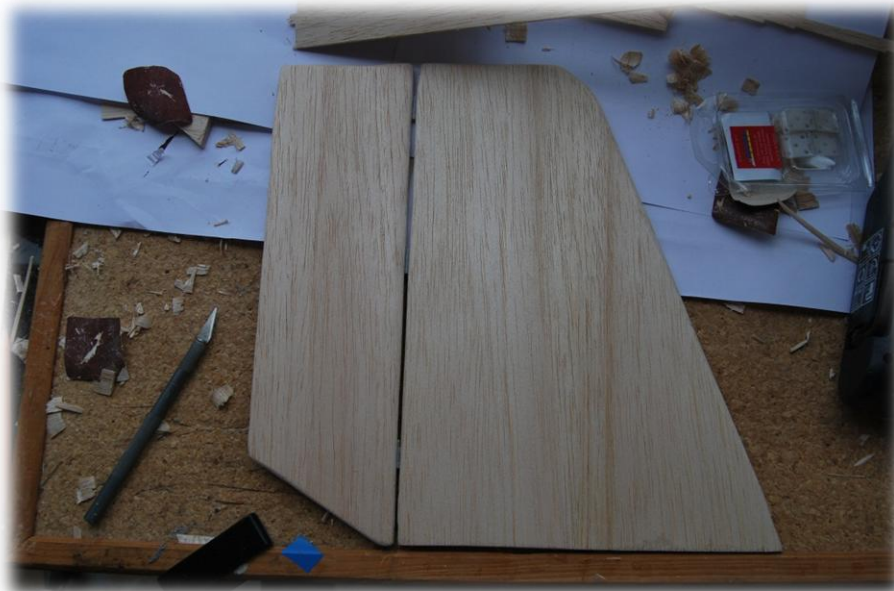
El talla-llistons consta d'una fulla de cúter de modelisme unida a un bloc de fusta que es pot desplaçar cap endavant o enrere per regular l'amplada del llistó.

Una vegada tallats els llistons s'ajusten a la grandària que indica el plànol i es fixen amb agulles perquè no es moguin mentre s'asseca la cola blanca. (fig.3.2)



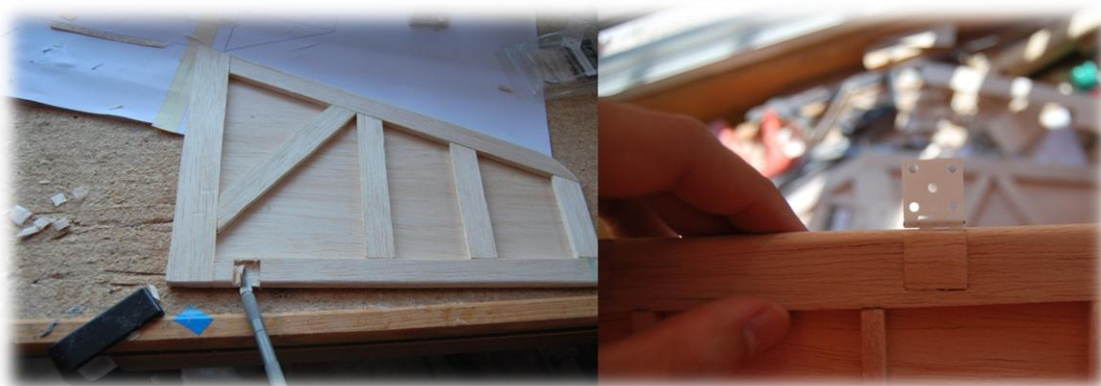
(fig.3.2) procés d'elaboració de la deriva

Una vegada la cola s'hagi assecat, enxaparem una de les dues cares amb balsa d'1 mm d'aquesta manera aconseguim una estructura molt sòlida però lleugera. (fig.3.3)



(fig.3.3) Deriva enxapada

A continuació, s'han de preparar els forats on aniran les frontisses, per fer-ho s'ha de tallar el forat a la mida idònia, es fica la frontissa sense enganxar-la i es tapa amb un retall de fusta, procurant que encaixi bé. (fig.3.4)



(Fig.3.4) Procés de preparació per instal·lar les frontisses.

Aquesta operació l'he de repetir tant en la deriva com a l'estabilitzador.

Tot seguit, per reduir la resistència aerodinàmica paràsita i per evitar que la fusta es malmeti en cas de pluja, o degut a l'oli del motor, s'ha d'entelar.

Per entelar els avions d'aeromodelisme s'utilitza un film de plàstic termoretràctil amb pegament termo adherible a una de les cares.

L'aplicació d'aquest film és difícil ja que costa molt que no hi quedin arrugues. Per començar s'ha de tallar un tros de film d'uns 2 cm més gran que la peça que he d'entelar (fin.3.5)



l'estabilitzador

(fig.3.5) Preparació del material per entelar

Tot seguit s'ha de retirar la capa protectora, per deixar la pega al descobert, i s'ha de ficar el film damunt de la peça. A continuació, amb una planxa a 100° C es planxen els extrems de tal manera que el film quedi estirat i ajustat (fig.3.6). Una vegada ja es tenen els extrems enganxats s'ha de passar la planxa a 120° C amb el fi d'enganxar el film i tensar-lo. Per acabar, és molt possible que quedin arrugues, per eliminar-les s'han de planxar a una temperatura de 140 a 150° C. Una vegada ja estigui entelat l'empanatge, s'han d'enganxar les frontisses. He utilitzat unes frontisses de niló amb eix d'acer, són lleugeres i resistents. Les he enganxades amb un pegament plàstic de gran elasticitat, que evitarà que es surtin amb les vibracions. Degut a que els timons de profunditat estan separats, he hagut de confeccionar una peça metàl·lica en forma d' U, amb corda de piano de 2 mm, aquesta peça manté els timons units amb el mateix angle tots dos. Quan el pegament de les frontisses hagi curat s'haurà d'unir la deriva amb l'estabilitzador de tal manera que formin un angle recte, per fer-ho s'ha de tallar el film de la base de la deriva i de la part central de l'estabilitzador perquè la pega pugui enganxar fusta amb fusta. Per enganxar aquesta part, ja que ha de suportar grans esforços, he utilitzat resina d'epoxi de 90 minuts de curació, però degut a la gran humitat, per culpa d'uns dies plujosos, no he tocat la peça durant una setmana, així m'he assegurat que l'epoxi curés correctament. Un cop curat, l'empanatge presenta aquest aspecte (fig.3.7):



(Fig.3.7) Empanatge acabat

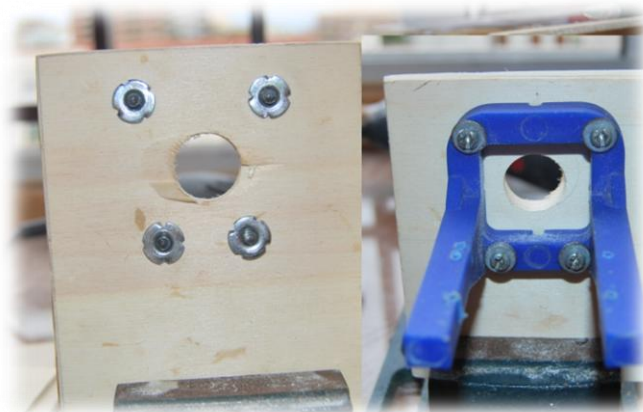
3.2.2. El fuselatge

El fuselatge és, per dir-ho d'alguna manera, el cos de l'avió; és l'encarregat d'allotjar els sistemes electrònics, el motor i de mantenir constants la distància entre les ales i l'empanatge i les seves incidències corresponents.

Primer, he confeccionat les quadernes, començant per la tallafocs:

La quaderna tallafocs és on es subjecta el motor, ha de ser molt resistent ja que suporta totes les vibracions del motor; per construir-la he utilitzat fusta contraplacada de xop de 3 mm, n'he enganxat tres d'iguals amb epoxi de 90 minuts, per tant ha quedat una quaderna de 9 mm molt resistent i lleugera. Un cop que la resina d'epoxi s'ha assecat he fet els forats pertinents per poder aguantar la bancada on anirà el motor i un més gran, al centre, per on hi passaran els tubs provinents del dipòsit. La bancada va subjectada amb cargols de 3 mm amb femelles autoempotrables, aquestes femelles porten unes pues que es claven a la fusta quan apretes el cargol, així, és impossible que s'afluixi amb les vibracions.

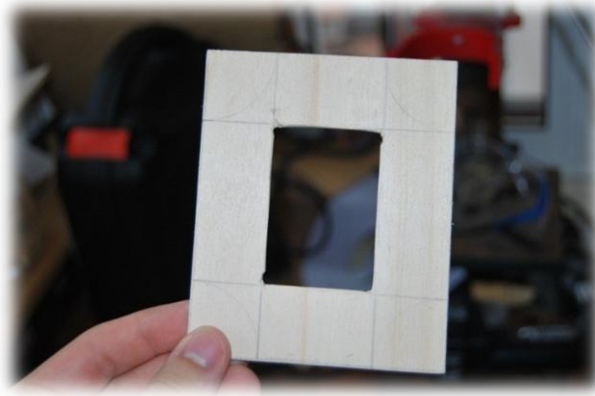
De moment, la quaderna tallafocs presenta aquest aspecte: (fig.3.8)



(fig.3.8) Quaderna tallafocs

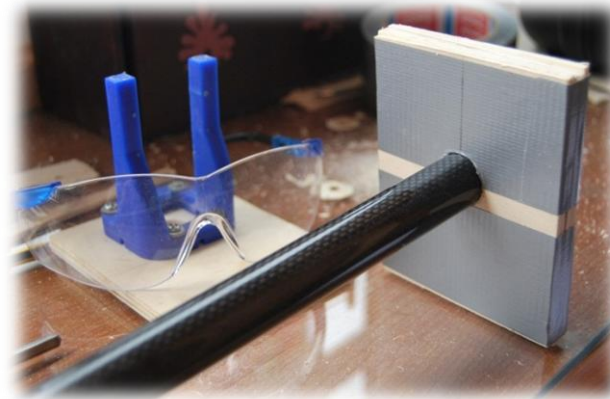
A continuació, la quaderna que separa el dipòsit de l'electrònica.

Aquesta quaderna té la funció d'augmentar la rigidesa del fuselatge, igual que la tallafocs, està construïda amb contraplacat de xop de 3 mm i alleugerada amb un forat rectangular al centre.(fig.3.9)



(fig.3.9) Quaderna

central



(fig.3.10) Quadernes posteriors

El tub de carboni, que uneix l'empanatge amb la "cabina" del fuselatge, s'ha de subjectar d'una manera molt resistent però a l'hora molt lleugera. Per tal efecte, he preparat cinc quadernes del mateix material que les anteriors. Aquestes, porten un forat circular de 20 mm de diàmetre, el mateix que el tub. Per fer que quedin iguals, les he unit amb cinta americana, he fet el forat, i amb el tub travessant-les, les he llimat fins que totes han quedat iguals.(fig.3.10)

Tot seguit, he de tallar les parts laterals del fuselatge, amb el mateix material que les quadernes. Un cop tinc els laterals, he d'enganxar les quadernes a les peces laterals amb l'epoxi de 90 minuts, és molt important que totes quedin paral·leles entre elles i perpendiculars a les laterals. Per assegurar-me que les quadernes que suportaran el tub de carboni quedin perfectament alineades, he passat el tub de manera que travessa tot el fuselatge fins arribar a la quaderna tallafocs. Si tot és correcte, el tub ha d'arribar fins el centre exacte de la quaderna. Durant el procés de curació de la resina he ficat 3,5 kg de pes damunt de l'estructura per tal que la pega faci bon contacte.(fig.3.11)



(Fig.3.11) Tècnica per assegurar la bona curació de la resina. fresadora de ma, s'ha de tenir



(fig.3.12) Tub de carbono tallat a mida.

A continuació, he de fer els talls necessaris per poder encaixar l'empanatge al tub de carbono.

Per fer aquests talls, primer he de cobrir la zona a tractar amb cinta de carrosser, així, serà més fàcil fer el tall amb precisió; tot seguit, he de marcar les zones a tallar amb un bolígraf. El tall s'ha de fer amb un disc abrasiu i una

fresadora de ma, s'ha de tenir present que la pols de carboni és molt perjudicial per a la salut ja que són microfibres que si les respirem poden causar càncer de pulmó i altres malalties. Per seguretat he utilitzat una mascareta amb filtre, guants de làtex i ulleres de seguretat. El tall queda d'aquesta manera: (fig.3.12)

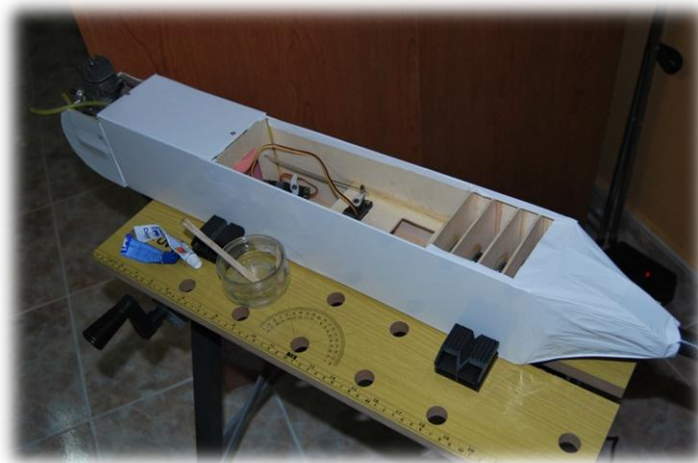
Ara és el moment de tancar el fuselatge per la part inferior amb fusta de balsa de 3 mm i preparar la safata de servomotors. La safata de servomotors és la bancada on es subjecten els servomotors del control del motor i dels timons de profunditat i direcció. Està feta de contraplacat de xop de 3 mm ja que ha de suportar grans esforços. Un cop tancada la part inferior del fuselatge i instal·lada la safata de servomotors, el fuselatge presenta aquest aspecte: (fin.3.13)



(fig.3.13) Part principal del fuselatge

Ara és el moment de preparar els carenats del fuselatge. Els carenats fan la funció de minimitzar la resistència aerodinàmica, en aquest avió n'hi ha un de desmuntable al morro, que amaga una mica el motor, i un entre el caixó del fuselatge i el tub de carboni. Com que el temps és limitat no he pogut fer-los amb fibra de vidre i els he fet de fusta. El carenat del morro consta de dos prolongacions laterals del fuselatge que arriben fins al con de l'hèlix, i una inferior que forma una corba que tanca les parts laterals pel davant. El carenat, de la part posterior, són dos simples planxes de fusta de balsa de 3 mm que un cop aplicat l'entelat formaran una superfície corba.

Ara que ja tinc l'estructura del fuselatge acabada és l'hora d'entelar-lo. Per entelar el fuselatge he utilitzat el mateix material que a l'empanatge. A la figura 3.14 es pot veure el fuselatge ja entelat amb les carenes.



(Fig.3.14) Fuselatge acabat i entelat.

Ara és el moment d'unir l'empanatge al tub de carboni. Per fer-ho, primer de tot, s'ha de retirar l'entelat de la zona de l'empanatge que estarà en contacte amb el tub, tot seguit s'han de fer els orificis a la part inferior del tub per què hi puguin passar dos cargols de rosca-xapa de mètrica M3. A continuació s'insereix l'empanatge a les ranures que anteriorment he tallat al tub, procurant que quedi perfectament alineat; s'aplica epoxi de 90 minuts a les juntes i s'enrosquen els cargols perquè no es mogui. Després de 5 dies de repòs, he d'inserir el tub al fuselatge a través de les quadernes que ha preparat per a tal fi i, procurant que quedi alineat, s'aplica epoxi de 90 minuts a les zones de contacte entre les quadernes i el tub de carboni. Aquesta vegada, l'epoxi s'aplica solament a la part superior i en abundància, durant el procés de curació anirà caient per la quaderna resseguint el contorn del tub, d'aquesta manera queda completament xop. (fig.3.15)



(Fig.3.15) Detall de la junta entre el tub de carboni i la part central del fuselatge

Ara és el moment de preparar els sistemes de transmissió entre els servomotors i els timons. Per fer-ho he triat el sistema *push-pull*, que consta de dos cables per cada timó que, tal i com indica el seu nom, un estira i l'altra empeny. Aquest sistema és molt lleuger i molt efectiu sempre i quan estigui ben instal·lat. A la figura 3.16 es mostra una seqüència d'imatges on es veu clarament en què consisteix aquest sistema.



(Fig.3.15) Detall del sistema *Push-Pull*

En aquest punt el fuselatge ja està acabat a falta d'instal·lar el tren d'aterratge que s'ha d'instal·lar un cop l'avió estigui acabat, d'aquesta manera es podrà adaptar al pes final.

3.2.3. La planta alar

La planta alar estarà dividida en tres semiales, dos extrems de 1.200 mm i una part central de 1.000 mm. Les semiales dels extrems, degut a que el tems era molt limitat, vaig decidir encarregar-les a l'empresa Maquelar. Aquesta empresa està especialitzada en la distribució de fibres i resines per a aeromodelisme, a part, ofereixen la possibilitat de construir ales per encàrrec. Les ales les tallen en un nucli de porex, i hi instal·len llarguers i alerons, les xapen en fibra, balsa o altres fustes, etc. En el meu cas les van tallar en pórex d'alta densitat i hi van instal·lar els alerons, llarguers de fibra de carboni i un rail per poder instal·lar el reforç que uneix les diferents ales. El resultat dels seu treball és el de la figura 3.16.



(fig.3.16.) Ales encarregades a Maquelar.

Per unir les dos semiales dels extrems, ha de construir una semiala central de 1.200 mm. Per fer-ho primer he d'imprimir les costelles amb el perfil *clark-y* i la mida adequada, això ho he fet amb el programa *Profil2*. Un cop impreses les plantilles, s'han d'enganxar a una planxa de fusta de balsa dura de 3 mm i s'han de tallar. Al final necessitarem 16 costelles tallades una a una. Tot seguit s'han de fer els encaixos per on passaran dos llistons de fusta de pi de 5x10 mm que faran de reforç. Un cop fets, es prepara una plantilla per tal de poder alinear totes les costelles i que siguin paral·leles entre si. Un cop enganxades als llistons, he de preparar l'extrem d'atac. Aquest és de balsa dura de 5 mm i de moment sobresurt un centímetre per dalt i per baix de les costelles, posteriorment veureu per què. Arribat aquest punt, les ales estan així: (fig.3.17.)



(Fig.3.17.) Ala central.

Tot seguit, s'ha de preparar la funda per la baioneta, aquesta ha de tenir un cert angle perquè així les ales quedaran en forma cònca, fet que afavorirà l'estabilitat. Aquesta funda és de llautó de 3x13 mm, per tal que quedi el més resistent possible, s'ha d'omplir el forat que queda entre la funda i el llarguer de pi amb balsa empapada d'epoxi. (fig.3.18)



(Fig.3.18.) funda de la baioneta

Ara he d'enganxar els reforços centrals. Aquests, van des del llarguer superior fins a l'inferior, estan fets de fusta de balsa de 3 mm amb la veta vertical. Cal dir que amb aquests reforços, es crea una autèntica biga molt resistent, abans d'instal·lar-los l'ala es doblegava sense fer gaire esforç però un cop instal·lats, per molta força que faci, l'ala no es doblega. (fig.3.19)



(Fig.3.19.) reforços centrals

Ara cal enxapar amb balsa de 1,5 mm l'extrem de fuga i l'extrem d'atac. Aquest es llimarà fins que s'adapti al perfil, per això ha de ser més gran que la costella. Una vegada ja estigui enxapat, s'hauran de passar els cables dels servos i posteriorment, entelar la semiala.



(Fig.3.20) A la dreta la semiala central ja enxapada, a l'esquerra ja acabada.

A la figura 3.20 es pot observar la semiala central amb l'enxapat i els cables dels servomotors ja instal·lats, i la semiala acabada amb entelat oracover blanc.

Ara toca el torn a les semiales dels extrems: s'han de fer els forats a mida on aniran instal·lats els servomotors, soldar i passar els cables d'aquests i entelar-les per reduir la resistència paràsit. Això es pot observar a la figura 3.21.



(fig.3.21.) Detall de l'orifici on s'allotjarà el servomotor i a l'esquerra la semiala extrem dreta ja entelada.

3.2.4. Tren d'aterratge

El que he triat és un tren principal fet a partir d'un sandvitx de fibra de carboni i kèblar, té una amplada de 370 mil·límetres i porta unes rodes d'espuma i cautxú de 85 mm de

diàmetre. A més a la cua hi ha una roda lliure d'espuma de 30 mil·límetres de diàmetre.(fig.3.22)



(fig.3.22.) Tren d'aterratge.

Tal i com es pot observar a la figura 3.22. he hagut de preparar un reforç per poder instal·lar el tren, a més, es pot veure el tub de carboni que travessa el fuselatge per poder aguantar l'ala. A continuació, he instal·lat un receptor de radiofreqüència sintetitzat, és a dir, detecta automàticament la freqüència de ràdio que utilitza la meua emissora i s'hi adapta; per alimentar tot el sistema elèctric he preparat un pac de bateries de NiMH de 800mAh i 4,8V de diferència de potencial entre els seus borns.



(fig.3.23.) Winglet

Per acabar , he instal·lat uns winglets a les ales, estan fets de fusta de balsa de 3mm i es poden desmuntar per un millor transport de les semiales. Els podeu veure un a la figura 3.23.

Ara, l'avió ja està llest per fer el seu primer vol, però degut al poc temps que quedava mentre vaig escriure aquestes línies i el moment de lliurar l'esborrany del treball, no vaig poder

trobar cap dia amb les condicions atmosfèriques adequades per al primer vol d'inauguració, tanmateix, espero poder-lo trobar abans del dia de la presentació oral davant del Tribunal.

3.2.5. Avió acabat

Per acabar, una foto (fig.3.24.) de l'avió acabat junt amb el seu dissenyador, constructor i pilot.



(Fig.3.24) Avió acabat

4-Conclusions

Com es pot veure durant el transcurs del disseny, aquest avió té una aerodinàmica molt cuidada, dintre dels límits que m'imposa la construcció artesanal, l'utilització de winglets, el fuselatge en tub i el carenat del motor augmenten el rendiment aerodinàmic. Si comparem aquest disseny amb el d'un altre avió tant en miniatura com tripulat, es pot marcar una clara diferència en l'allargament de les ales, que són molt més llargues però també molt més estretes. Per posar un exemple d'aquesta característica, compararé el meu disseny amb una RV-6, un avió semi acrobàtic tripulat, i amb un Ventus 2cM, un veler monoplaça tripulat.



(Fig.4.1) Comparació entre el meu disseny i el d'una RV-6.

Com es pot veure a la figura 4.1, en el disseny de la RV-6, al ser un avió semi acrobàtic, és més important la potència del motor que l'aerodinàmica, té les ales completament rectangulars, això provoca una pèrdua de rendiment a baixes velocitats però ofereix molta més agilitat que les ales amb un gran allargament.



(fig.4.2) Comparació del meu disseny amb un Ventus 2cM.

A diferència de l' RV-6, El Ventus 2cM és un veler pur, té un allargament molt pronunciat el qual és molt superior al del meu disseny. Es poden observar els winglets a les puntes de les ales, a més, per millorar la resposta del timó de profunditat, porta una cua en T, es a dir, porta l'estabilitzador damunt de la deriva, això impedeix que l'estela d'aire turbulent que deixen les ales interfereixi en l'estabilitzador. Això no ho he pogut fer en el meu disseny degut a que complica de manera molt notable la dificultat i complexitat en el disseny i la construcció de l'empanatge.

Durant el primer vol vaig posar a prova les característiques del meu disseny. El perfil que he escollit ha sigut molt encertat ja que en el moment en que agafa una mica de velocitat ja sustenta i l'avió s'enlaira sense haver d'estirar amb el timó de profunditat. Les dimensions de la deriva són les correctes ja que mantenen les ales encarades al flux d'aire sense fer cap oscil·lació ni vertical ni transversal, per altra banda, els timons de direcció i de profunditat i els alerons estan ben dimensionats ja que em permeten un control total de l'avió tant a altes com en baixes velocitats. El pes final de l'avió ha sigut de 3.400 g, això ha provocat que la velocitat d'entrada en pèrdua sigui molt baixa, i el moment en que hi entra ho fa molt lentament i sense fer cap estrany. Degut a que no disposava de pressupost suficient com per instal·lar un sensor de velocitat, no la puc saber amb precisió però, puc assegurar, que la velocitat màxima és molt elevada, fins i tot diria que supera la prevista que és de 110 Km/h. La velocitat d'ascens amb motor s'ajusta a la prevista, però en canvi la velocitat de pèrdua d'altura durant el planeig és molt inferior, això es nota, sobretot, durant els aterratges ja que si t'encares a pista amb massa velocitat, malgrat pugis els alerons per tal que facin de frens aerodinàmics, l'avió es passa de pista i, si encara porta el motor encès, s'ha de repetir l'aproximació.

Durant el vol en tèrmica, que és pel que ha sigut dissenyat aquest avió, supera totes les meves expectatives. El dia del primer vol vaig deixar el motor a ralentí a una altura de 200 m i amb pocs minuts les ales de 3 metres i mig de longitud semblaven un punt en el cel. Això demostra que és capaç de volar durant hores amb el motor parat només utilitzant les corrents d'aire naturals per volar.

Bibliografia

Per poder dur a terme aquest treball he utilitzat:

NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), Math Engineering & Tecnology.
<http://www.allstar.fiu.edu/aero/airflylv3.htm> [Consulta des del 5 de juny al 3 de setembre del 2010]

Biblioteca Pleyades. www.bibliotecapleyades.net/egipto/esp_egipto_mist_3.htm [Consulta: 25 d'agost de 2010]

CHÍES Ignacio: "Diseña tu propio avión" *Rc Model Aero* vol. 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65 i 66. Apartat de tècnica. [Consulta durant tot el procés del treball]

El límite es el cielo. Blog dedicat a la difusió de l'aeromodelisme. <http://furia-aeroema.blogspot.com/2007/12/un-poco-de-historia-del-aeromodelismo.html> [Consulta: 24 d'agost 2010]

Radiocontrol.es. Web dedicada a la difusió de l'aeromodelisme. <http://radiocontrol.es/contentid-43.html> [Consulta: 25 d'agost 2010]

Radiocontrol.es. Apartat dedicat a la construcció d'un avió entrenador.
<http://radiocontrol.es/contentid-43.html> [Consulta: des del 3 de setembre fins al 5 de gener del 2011]

RC Ibérica. Web dedicada a la difusió del modelisme. <http://www.rc-iberica.info/article-25552358.html> [Consulta: 23 d'agost 2010]

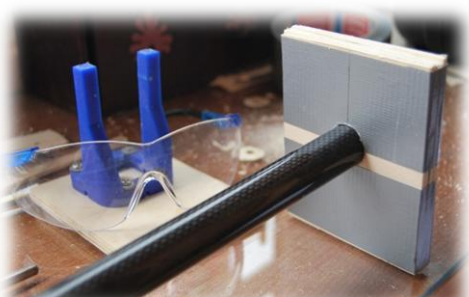
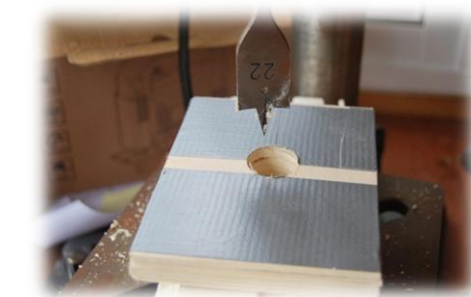
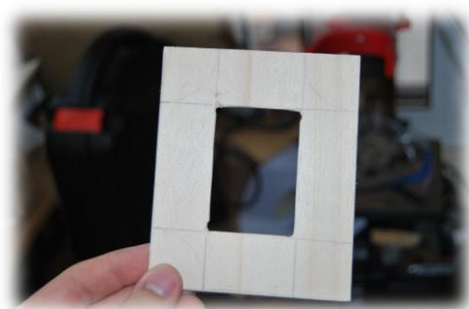
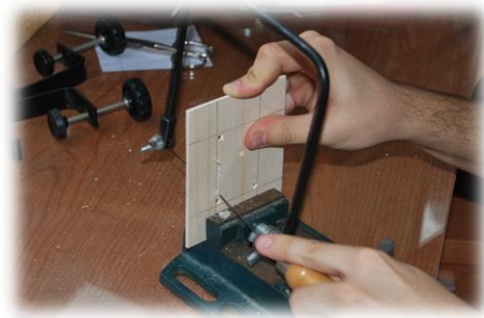
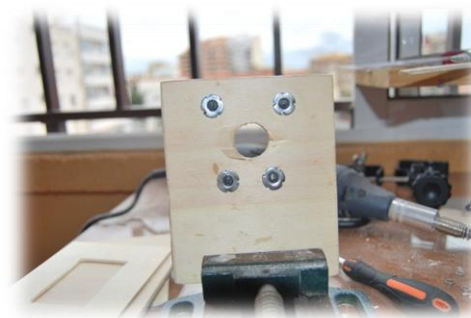
Wikipèdia. Enciclopèdia en línia. http://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_aviaci%C3%B3n [Consulta: 24 d'agost 2010]

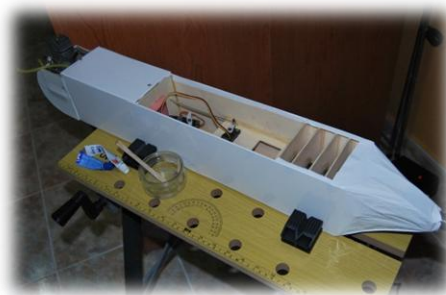
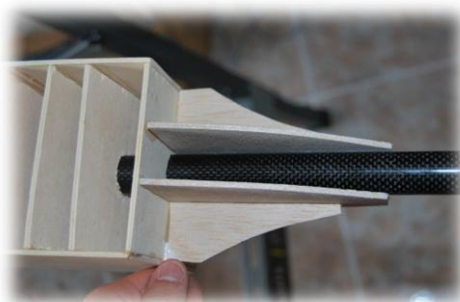
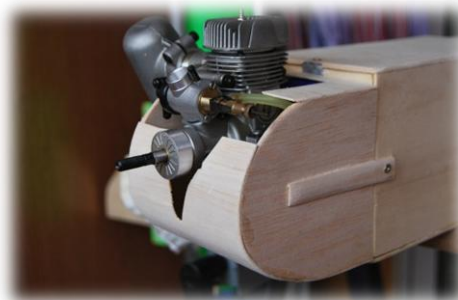
Annex

En aquest annex hi ficaré algunes fotografies més detallades de la construcció.

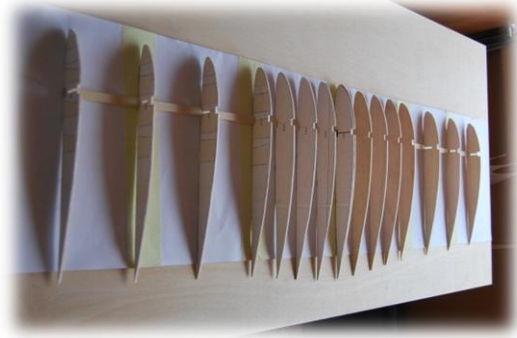
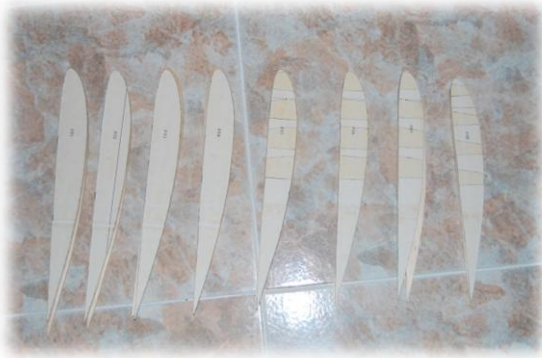
Empanatge i fuselatge:

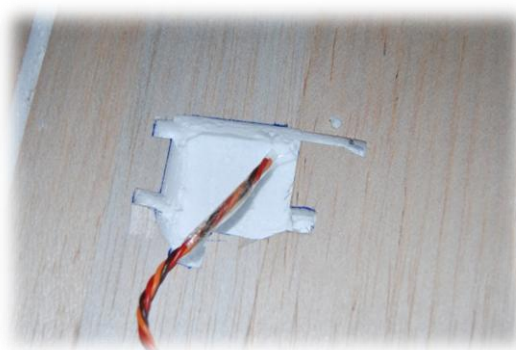






Planta alar:





Tren d'aterratge:







