

CONSTRUCCIÓ I EJECCIÓ D'UN COET

Curs: 2n de Batxillerat

Any: 2019-2020

RESUM

Mogut per la motivació i l'interès en els coets i tot tipus d'esdeveniments que succeeixin a l'espai exterior, l'autor va veure idoni fer un treball de recerca dirigit cap a aquest tipus d'estructures.

Per entendre com funciona un coet, es va necessitar documentació prèvia, mitjançant professionals en el món de l'enginyeria aeroespacial i a partir de documents .pdf extrets de fonts fiables. Un cop assolida tota la informació recercada, era ben entès el funcionament dels coets i es va passar a l'acció construint-ne un per a la seva posterior ejecció.

ABSTRACT

Led by the motivation and interest in rockets and all sort of events that occur in space, this project's author saw it ideal to do a research project directed to this type of structures.

To understand how a rocket works, it was needed previous documentation, with the help from professionals related to the world of aerospace engineering and also through .pdf documents extracted from reliable sources. Once caught all the researched information up, the rockets' operation was well understood, so it was time to take action. A model rocket was built, as a purpose of being launched later on.

TAULA DE CONTINGUTS

| | |
|--|----|
| RESUM/ABSTRACT | 1 |
| AGRAÏMENTS | 4 |
| INTRODUCCIÓ | 5 |
| 1.- COM FUNCIONA UN COET | 6 |
| 1.1.- COM FUNCIONEN ELS COETS? | 6 |
| 1.2.- ELS COETS PROFESSIONALS | 6 |
| 1.3.- TIPUS DE COETS | 6 |
| 1.4- LES ETAPES DE VOL | 7 |
| 2.- LES SEVES PARTS | 9 |
| 2.1- EL CON | 9 |
| 2.2- SECCIÓ DE CÀRREGA ÚTIL O <i>PAYLOAD SECTION</i> | 13 |
| 2.3- SECCIÓ DE TRANSICIÓ O <i>TRANSITION SECTION</i> | 14 |
| 2.4- CORDA ELÀSTICA | 14 |
| 2.5- PARACAIGUDES | 14 |
| 2.6- MUNTATGE PER LA CORDA ELÀSTICA | 15 |
| 2.7- LÍNIES DE COBERTA | 16 |
| 2.8- PAPER IGNÍFUG | 17 |
| 2.9- EL TUB O COS DEL COET | 18 |
| 2.10- LA GUIA | 19 |
| 2.11- LES ALETES | 20 |
| 2.12- EL PORTA MOTOR | 22 |
| 2.13- EL MOTOR | 23 |
| 2.14- L'ENCENADOR | 27 |

| | |
|--|----|
| 3.- L'ESTABILITAT | 29 |
| 3.1- MOVIMENTS DEL COET DURANT EL VOL | 31 |
| 3.1.1- Moviment de translació | 31 |
| 3.1.2- Moviment de gir | 32 |
| 3.1.3- Moviment de rotació | 32 |
| 3.2- COM ACONSEGUIR UN SISTEMA ESTABLE | 32 |
| 3.3- LOCALITZACIÓ DEL CENTRE DE GRAVETAT (CG) | 34 |
| 3.4- LOCALITZACIÓ DEL CENTRE DE PRESSIONS (CP) | 35 |
| 3.4.1- Localització del CP del con | 36 |
| 3.4.2- Localització de la força normal en el con | 36 |
| 3.4.3- Localització de la força normal en les aletes | 36 |
| 3.4.4- Localització del CP en les aletes | 38 |
| 3.4.5- Combinació de càlculs | 39 |
| 3.5- CONCLUSIONS EN ESTABILITAT | 40 |
| | |
| 4.- EL LLANÇAMENT | 41 |
| | |
| CONCLUSIONS | 43 |
| | |
| FONTS DOCUMENTALS | 44 |
| | |
| ANNEXOS | 45 |

INTRODUCCIÓ

Aquest projecte de recerca té com a objectiu construir un coet i fer-lo enlairar. Així doncs, la metodologia es basa en buscar tota la informació necessària sobre els coets i aplicar-la per construir un coet personalitzat.

L'objectiu, tot i semblar simple, requeria més del que es veu des de fora. Llençar un coet és el que veu tothom. Però que aquest, no només sigui llençat i segueixi la seva trajectòria de 90 graus respecte al terra, sinó que després obri el paracaigudes, el coet arribi al terra i no hagi patit cap tipus de dany, és el que veu l'autor el treball. Per tant, se sabia que anava a ser un projecte exigent, i això motivava més a continuar endavant.

També vull calcular l'alçada màxima que assoleix el coet, i per fer aquell càlcul necessitaré la gravació, un sistema de referència i utilitzar la trigonometria.

La memòria s'ha estructurat en quatre capítols diferents.

En el primer s'explica com (quines lleis) i què (quins materials) és el que fa que un coet s'enlairi, a part d'explicar quines són les etapes que pren un coet durant el vol.

En el segon capítol es divideixen totes les parts d'un model de coet, i a més es documenta com es van crear totes les parts del model de coet personalitzat pel treball.

El tercer capítol està especialitzat en l'estabilitat del coet, ja que és un fenomen essencial si es vol prendre altura en un vol. En ell es parlen de totes les forces que hi actuen i com aprendre a fer-les servir al teu favor. S'hi plantegen, a més, tots els càlculs que s'han utilitzat per conèixer quina era l'estabilitat del model de coet.

Finalment, el quart capítol parla sobre el llançament del coet, el resultat final i quines conclusions s'hi poden extreure.

Als Annexos s'hi troben imatges de la zona de llançament i links pels vídeos del llançament

CAPÍTOL 1: COM FUNCIONA UN COET

Per entendre bé el funcionament del treball, primer s'han d'entendre bé els conceptes i quines són les raons per les quals els coets es poden enlairar sense perdre el control. Aleshores, en aquest apartat, s'explicarà com funcionen els coets, quines lleis segueixen i molt més.

1.1- Com funcionen els coets?

Un coet és un vehicle o estructura que, a través d'un motor amb un combustible suficientment potent per propulsar la massa requerida, produeix energia cinètica (per costum en direcció contrària a la gravetat). És clar que com més potència tingui el motor el coet serà capaç d'adquirir més altura.

Els coets segueixen una de les tres famoses lleis de Newton, la tercera, també coneguda com el principi d'acció i reacció. Aquesta llei explica que qualsevol cos que experimenti una força exterior per part d'un altre cos, aquest cos rep una força de la mateixa magnitud però en sentit contrari. Així, tenim que la força que rep tota l'estructura per part dels gasos expulsats en la combustió, és tornada en sentit contrari. Aquesta força tornada en sentit contrari és la que fa que tota l'estructura sigui capaç d'alçar-se per prendre vol. Aleshores, com més violentes i potents siguin les combustions del motor del coet, més facilitat tindran per aixecar aquest (deixant de banda la massa, que pren un paper molt important). $F_{12} = -F_{21}$

1.2- Els coets professionals.

Els coets professionals utilitzen un tipus de combustible diferent al que jo utilitzaré (degut al preu). Els coets més potents utilitzen dos tancs, un d'Hidrogen i l'altre d'Oxigen, els quals al combustionar amb foc formen una reacció d'elevada entropia.

1.3- Tipus de coets.

- De coets en trobem dos tipus segons el tipus de combustible que utilitzen:
 - Coets amb combustible sòlid: Són aquells que contenen un tanc de propel·lent (Hidrogen, per exemple) barrejat amb l'oxidant (Oxigen, per exemple) en estat sòlid. En el moment en que s'encengui amb foc començarà a cremar i expulsar gasos degut a les seves reaccions químiques. En aquest treball s'utilitzarà aquest tipus de combustible, però com a propel·lent es farà servir un motor comprat des d'una pàgina web.
 - Coets amb combustible líquid: En aquest cas hi ha dos tancs, un per mantenir el propel·lent i l'altre per mantenir l'oxidant. Cada tanc té una obertura controlada, que deixa passar la substància a una càmera de combustió on s'hi ajunten les dues substàncies i reaccionen de forma molt violenta a través de foc. Els coets més professionals utilitzen aquest mètode.
- Segons les fases que contingui un coet tenim:
 - Coet d'una sola fase: Un cop el motor deixa de cremar, es desprèn del cos del coet i, o bé pot desplegar-se el paracaigudes o bé el cos segueix el seu camí per l'espai (al no haver gravetat la presència d'un paracaigudes manca de sentit).

- Coet de múltiples fases: Solen ser dues. D'aquesta forma, quan el primer combustible s'acaba, es desprèn i dona lloc al següent, que començarà a cremar gràcies al primer. I així successivament. Aquest mètode permet al coet augmentar la seva capacitat de càrrega, ja que no depèn d'un sol motor.

Per construir el coet del treball, es va decidir fer-lo d'una sola fase, ja que actualment encara no es tenen els suficients coneixements com per construir-ne un de múltiples fases. Els coets de múltiples fases necessiten motors més potents que jo no sóc capaç d'adquirir sense permisos especials.

1.4- Les etapes de vol.

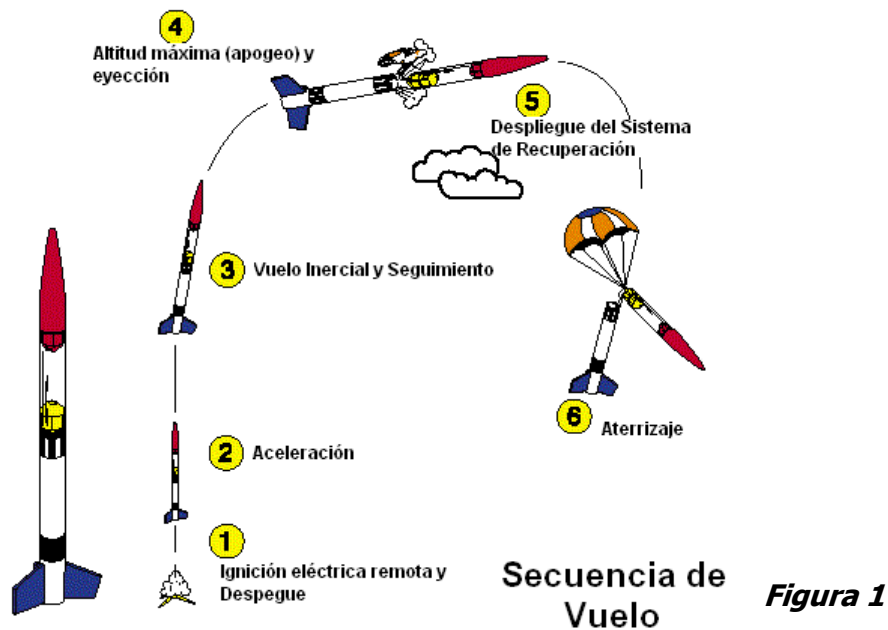


Figura 1

Amb una imatge (Figura 1) s'entendran molt millor les etapes de vol que pren un coet.

1- La ignició és el moment en el qual s'encén amb un *igniter* o encenedor per a que comenci a cremar. Expulsarà els gasos i el coet s'eleva.

2- L'acceleració és la que agafa el coet deguda a la força creada pels gasos que empeny el combustible. Al cap i a la fi, la força és acceleració multiplicada per la massa del cos ($F = m \cdot a$), per tant tota la força que se li apliqui al cos es veurà resultant com a acceleració presa pel coet. D'aquesta fórmula podem extreure la conclusió de que un motor amb força constant crearà una acceleració més gran com més petita sigui la massa. Aleshores la massa és crucial per fer un coet el més veloç possible.

3- En el vol inercial ja no hi actua la força del motor (s'ha cremat tot) i el coet segueix per inèrcia uns quants metres més fins que finalment la gravetat el frena i comença a baixar.

4- En l'apogeu el coet es troba en el punt més alt, a partir d'allà comença a baixar.

5- S'hi desplega el paracaigudes, de tal forma que es recupera tot, i l'únic que s'ha de reemplaçar pel següent vol és el motor.

6- Aterratge de forma suau, gràcies al paracaigudes.

CAPÍTOL 2: LES SEVES PARTS

Un coet com el que es vol fer és un coet molt simple comparat amb els que utilitzen grans empreses com la NASA, per exemple, almenys en quant a parts o peces. El coet d'aquest treball portarà el mínim de parts imprescindibles per a que pugui prendre vol sense cap problema, i aquestes han de pesar el menys possible, ja que hi ha una gran limitació en quant a motors (no es pot sobrepassar un tipus de motor sense una llicència, i no hi ha pressupost per utilitzar Hidrogen i Oxigen).

A continuació, en la Figura 2, es mostra tot un coet amb les seves parts diferenciades, de manera que s'utilitzarà la seva imatge per concretar cada component:

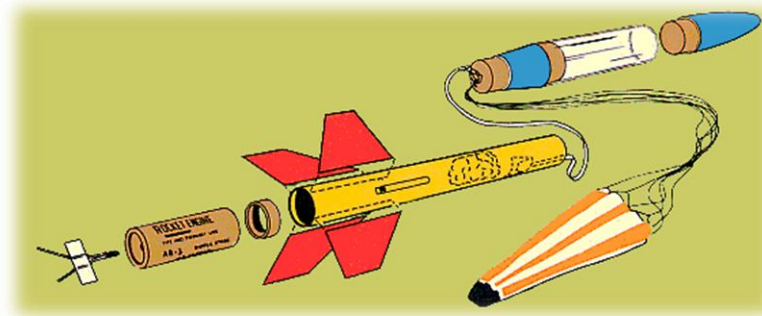


Figura 2

2.1- El con.

El con és la part del coet més llunyana al motor. És molt normal trobar-lo de forma punxeguda o ogival, ja que com en un coet es busca la màxima efectivitat de vol, aquesta forma proporciona la millor aerodinàmica per deixar escapar la resistivitat amb el vent, empenyent aquest cap als costats. En la figura 3 s'hi mostren les diferents formes possibles per al con del coet.

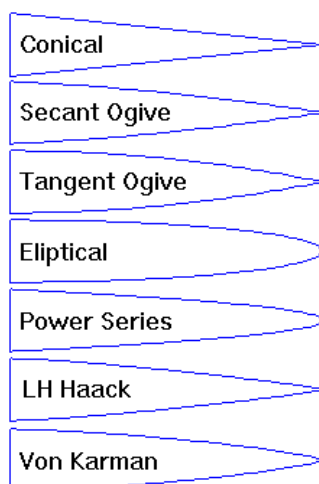


Figura 3

També hi ha un altre tipus de forma, l'anomenada de Series de Haack, recomanada per a vols supersònics, junt amb la de Von Karman, les quals minimitzen de la forma més efectiva l'arrossegament amb l'aire.

Junt amb el con s'hi troba incorporat un acoblament, el qual té un diàmetre lleugerament més petit que el tub (el cos) al que s'uneix, de tal forma que s'enganxa a aquest i no surt degut a la pressió que s'hi forma (Figura 4).



Figura 4

No obstant, construir una estructura així no és tant fàcil com pot semblar. Existeixen grans quantitats de fórmules que descriuen totes aquestes formes, i el fet de que una forma determinada superi millor o pitjor el fregament amb el vent no és casualitat. Ara veurem com funciona:

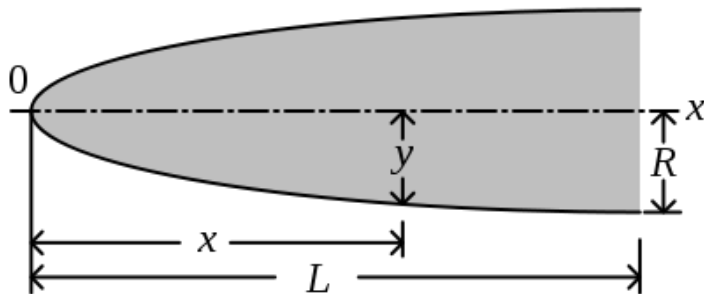


Figura 5

Primer ens centrem en la figura 5 i especifiquem els paràmetres, que seran els mateixos per a totes les fórmules que venen a continuació. L és la longitud total del con i R és el radi de la seva base. Y és el radi en qualsevol punt x de la longitud, comprès entre 0 i R. X varia des de 0 fins a L.

1. Forma cònica (Figura 6): Tot i no ser gaire efectiva, aquesta forma s'escull molt per la seva facilitat i senzillesa per ser fabricada. Els seus costats són línies rectes, per tant la seva posició es regirà per una fórmula simple com la següent:

$$y = \frac{xR}{L}$$

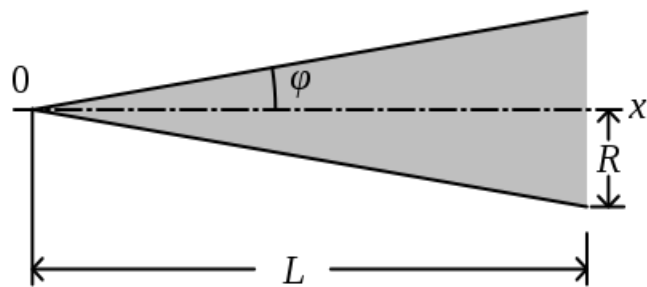


Figura 6

2. Forma cònica amb punta esfèrica: Bàsicament, es tracta també d'una forma cònica però afegint-hi un segment en forma d'esfera a la punta, els quals coincideixen en un punt, el punt de tangència. El punt de tangència es pot trobar de la següent forma, on r_n és el radi de la circumferència que es troba en la punta:

$$x_t = \frac{L^2}{R} \sqrt{\frac{r_n^2}{R^2 + L^2}}$$

$$y_t = \frac{x_t R}{L}$$

El centre de la punta esfèrica es pot trobar amb:

$$x_o = x_t + \sqrt{r_n^2 - y_t^2}$$

No hi ha y_o , perquè es troba en l'origen d'ordenades.

Finalment el vèrtex del con es pot saber amb la simple resta que relaciona el centre de l'esfera amb el seu propi radi:

$$x_a = x_o - r_n$$

En la Figura 7 s'hi representen tots els paràmetres demostrats anteriorment:

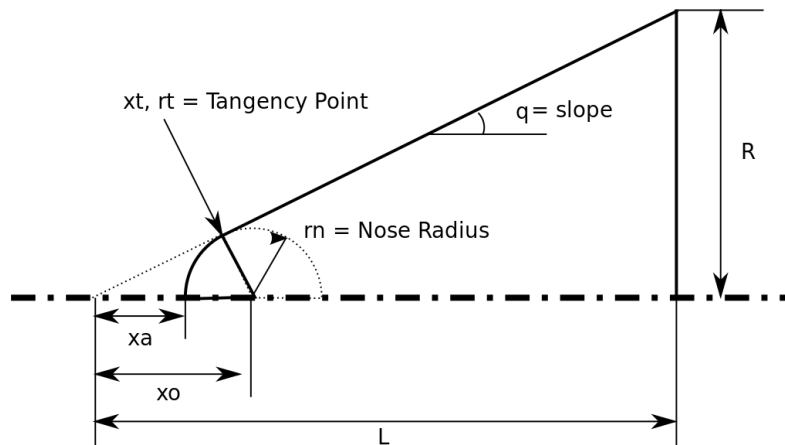


Figura 7

3. Forma d'ogiva tangent (Figura 8): El perfil d'aquesta figura està formada per un segment d'un cercle de tal forma que el cos del coet sigui tangent a la corba de la base del con.

El radi del cercle que forma la ogiva és la lletra grega ρ , i està relacionada amb la longitud i el radi de la base del con a partir de la fórmula:

$$\rho = \frac{R^2 + L^2}{2R}$$

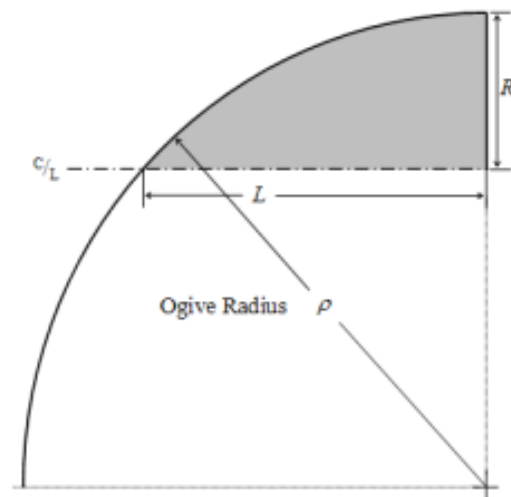


Figura 8

El radi y en qualsevol punt x (variant de 0 a L) és determinat per:

$$y = \sqrt{\rho^2 - (L - x)^2} + R - \rho$$

La longitud L no pot ser més gran que ρ . En cas de que siguin iguals ens trobem amb una esfera.

D'acord amb la Figura 9, la finesa d'un con varia segons la seva longitud L i el seu diàmetre, ja que és una relació entre aquests dos. Així, la fórmula per trobar la finesa d'un con és la següent:

$$Fn = \frac{Lcn}{de}$$

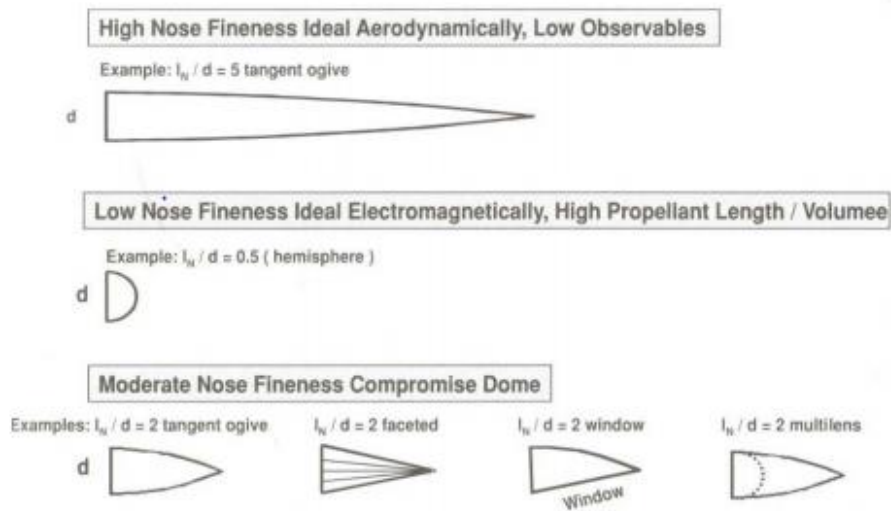


Fig. 2.5 Nose fineness alternatives.

Figura 9

Una finesa de 5 és ideal aerodinàmicament, mentre que una finesa de 0,5 serveix molt més en l'aspecte electromagnètic com quan s'utilitzen elements de comunicació.

Per aconseguir un con que fos de material resistent, i per tant m'assegurés que durant el vol no patís incidents, vaig decidir imprimir-ne un amb impressora 3D (Figura 10). Així, a més, es podia saber que anava a ser un material lleuger.

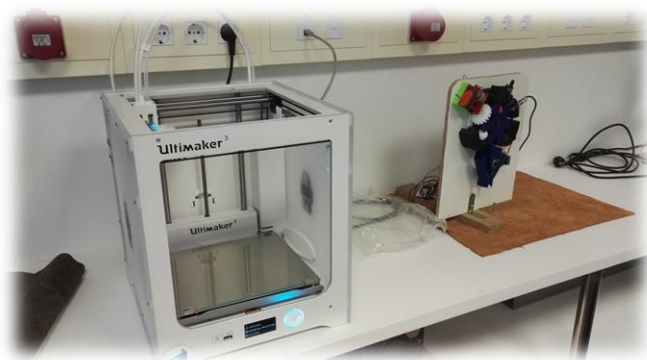


Figura 10

Pel meu model de coet vaig decidir calcular una finesa al voltant de 3, ja que una finesa de 5 significaria que el meu coet arriba a una velocitat supersònica. Com que el meu model aconseguirà una velocitat subsònica, el con (Figura 11) tindrà un diàmetre de 24 mm per la base cilíndrica i 28 mm de base de la ogiva. L'altura de la ogiva es de 70 mm (7cm) i l'altura total del con de 84 mm.



Figura 11

I ara, calculem la finesa:

Per calcular la finesa no s'han de tenir en compte les dades de tot el con (ogiva + cilindre), sinó que només agafarem les mesures de la ogiva, ja que és la part que es troba en l'exterior, per tant:

$$Fn = Lcn / de$$

$$Fn (\text{model}) = 70 / 28 = \mathbf{2,5}$$
 és la finesa del meu con.

Al final del con s'hi ha de col·locar una anella que pugui estar connectada amb el tub, ja que quan el motor faci l'explosió i alliberi el con, si aquest no està unit a res es despendrà del coet. Aleshores a aquesta anella s'hi enganxa una corda que també estarà unida al tub. I aquesta corda mantindrà les dues parts connectades en el moment que el con se separi del coet (Figura 12).



Figura 12

2.2- Secció de càrrega útil o *payload section*.

És la part que segueix el con, al qual hi està enganxada. No tots els coets solen tenir aquesta part, ja que és el lloc en el que s'hi col·loquen diferents instruments per calcular característiques sobre el vol del coet. Aquests instruments poden ser un altímetre, una càmera per gravar, un dispositiu que calculi l'acceleració o velocitat màximes i moltes més variants (Figura 13).

El meu model de coet no serà tant complex com per necessitar secció de càrrega útil, per tant, aquesta part no hi serà. A més, com més materials porti més complicat li serà al coet accelerar, aleshores és important comptar amb que porti el mínim de pes possible.



Figura 13

2.3- Secció de transició o *transition section*.

A l'igual que la secció de càrrega útil, no tots els coets hi tenen incorporades seccions de transició, ja que la funció d'aquesta és unir la *payload section* amb tub o cos principal del coet, i si un coet no conté una secció de càrrega útil, no necessitarà cap component per unir aquesta amb el cos o tub (Figura 14).

I com que el meu coet no portarà secció de càrrega útil, tampoc necessitarà secció de transició.

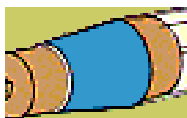


Figura 14

2.4- Corda elàstica.

Aquesta corda és indispensable. Sense ella no hi hauria manera d'unir el cos del coet amb el tub, i en el moment en què aquestes dues es separen el paracaigudes no aguantaria ambdues. La corda es lliga amb l'anella del con i s'enganxa amb cola forta al tub del coet, envoltada en paper (Figures de 15 a 17).

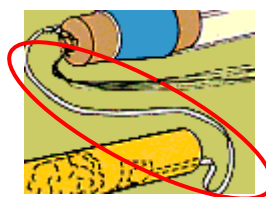


Figura 17

Figura 16

Figura 15



2.5- Paracaigudes.

El paracaigudes apareix en el moment en què el motor fa l'explosió final i aquesta fa que es separin la secció de transició i el cos. Un cop aquests estan separats, com que el paracaigudes es troba entre mig, per simple inèrcia amb l'aire aquest s'obrirà i gràcies a la corda elàstica que manté unides les dues parts, el paracaigudes frenarà la caiguda lliure de les ja dues separades parts del coet. Finalment arribarà al terra de forma suau (Figura 18).

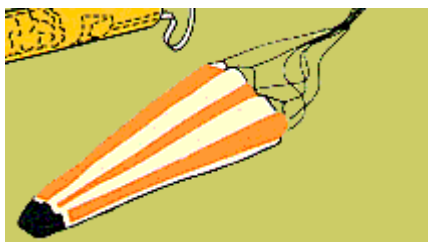


Figura 18



Figura 19

Per fer el paracaigudes es va aprofitar una bossa d'escombraries (Figura 19). Per utilitzar la bossa d'escombraries es van utilitzar els consells d'un home experimentat en el món dels models de coet, el Luis, el qual pertany a l'associació *Spain Rocketry*, l'associació més gran de models de coet d'Espanya, i de les més grans d'Europa. Així doncs, es va tallar, se li van fer 6 forats de forma simètrica i s'hi va passar un fil de cosir de tal forma que quedés així (Figures 20-21):



Figura 20



Figura 21

2.6- Muntatge per la corda elàstica.

La principal funció d'aquesta part és mantenir ben enganxada la corda elàstica que unirà el cos amb la secció de transició. Hi ha moltes formes variades per fer-ho, però la més comú es tracta d'enganxar un dels extrems de la corda amb un tros de paper doblegant durant diverses vegades per sobre, per a que aquesta no s'escapi. Posteriorment s'enganxa aquest paper amb cola resistent al cos (Figura 22).



Figura 22

Per fer el meu muntatge per la corda elàstica vaig utilitzar una plantilla i la vaig retallar (Figures 23-24)

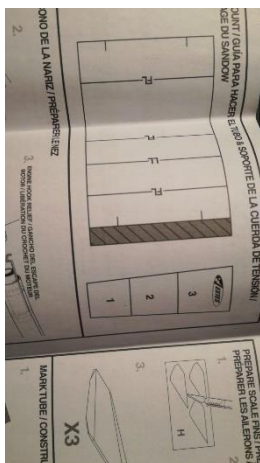


Figura 23

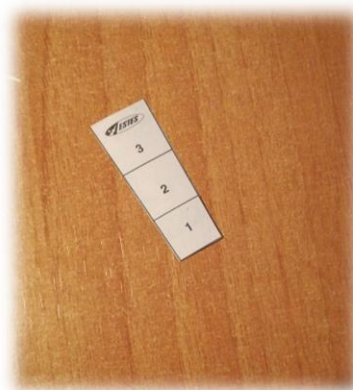


Figura 24

A partir d'allà, el que es va fer va ser enganxar-hi la corda amb *GomaGóm*, un tipus de *Superglue* molt fort i resistent. Posteriorment, quan ja vaig haver envoltat la corda per dues capes, doblegant el paper, vaig enganxar el conjunt al tub interior del cos amb el mateix tipus de cola (Figures de 25 a 27)

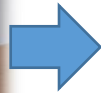
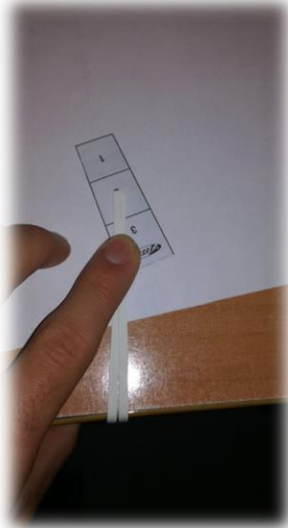


Figura 25

Figura 26

Figura 27

Un cop ja tenim la corda elàstica dins del tub ens podem assegurar de que en el moment que el motor faci l'explosió i desprengui el con, aquest es quedarà unit al tub.

2.7- Línies de coberta.

Aquestes són unes cordes que uneixen el tendal del paracaigudes amb la resta del coet. Solen ser unes 6 ó 8 cordes, i estan fetes de materials resistents, ja que aquestes són les que aguanten tota la massa del coet en un moment determinat.

Aquests fils passaran per l'anella del con, de tal forma que quan aquest es separi del cos el paracaigudes, per inèrcia s'obrirà i farà baixar lentament tot el coet (Figures 28-29).



Figura 28



Figura 29

Per col·locar les línies de coberta a l'anella del con s'hi va donar una volta i s'hi va fer un nus, així no es podia escapar el paracaigudes. Un cop ja es trobava lligat, el vaig embolicar sobre ell mateix i posteriorment el es va col·locar dins del tub del coet, on aniria separat del motor pel paper ignífug, per evitar que el paracaigudes es cremi (Figures de 30 a 32).



Figura 30

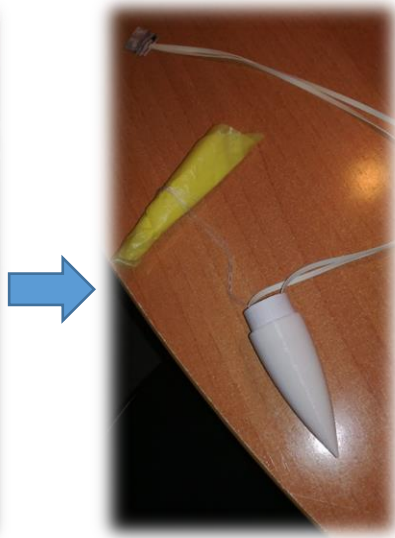


Figura 31



Figura 32

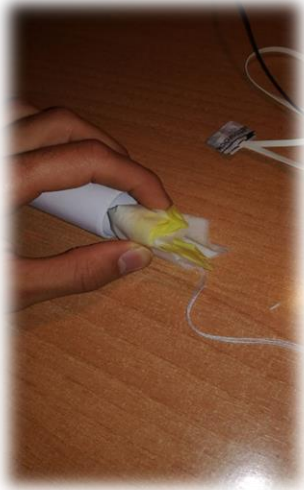
2.8- Paper ignífug.

El paper ignífug és un tipus de paper que no reacciona amb el foc, i a l'estar en contacte amb ell no crema, a diferència del que faria un paper normal. Aleshores aquest paper es col·loca entre el paracaigudes i el motor, fent així que el paracaigudes quedi protegit de la càrrega d'ejecció (explosió) que provoca el motor un cop ha cremat tot el combustible. Gràcies al paper ignífug el paracaigudes no es crema i podrà frenar la caiguda del coet correctament (Figura 33).



Figura 33

El paper ignífug, tot i no ser una part molt nombrada, és clau en el desenvolupament del vol. Així que em vaig assegurar preguntant-li al Luis de *Spainroketry* que em va afirmar que amb paper de forn ja n'hi ha més que suficient per a fer un coet segur. Així doncs, vaig agafar el paper de forn, el vaig trencar en tires petites i les vaig posar envoltant el paracaigudes i evitant així que aquest es pogués cremar.



A continuació, es mostra en la Figura 34, el procediment per protegir el paracaigudes del foc del motor mitjançant el paper de forn.

Figura 34

2.9- El tub o cos del coet.

És l'estructura principal del coet. Els tubs solen estar fets de materials com paper, fibra de vidre o plàstic. És el lloc on hi va el muntatge del motor, per aguantar aquest. A part, també s'hi troba el paper ignífug amb el paracaigudes per davant (Figura 35).

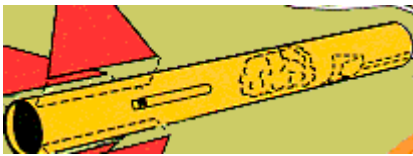


Figura 35

Per fer el cos del meu coet, em vaig ajudar d'un tub de cartró dels de paper de cuina. A partir d'allà vaig agafar paper de foli blanc i vaig començar a donar-li voltes a mesura que ho anava enganxant amb cola de barra *Pritt*. A la que portava 4 capes, deixant-ho reposar al sol, el cos va quedar suficientment dur com aguantar les forces de pressió del llançament. D'aquesta forma es pot aconseguir un tub de la manera més econòmica possible (Figures de 36 a 38).



Figura 36



Figura 37



Figura 38

2.10- La guia.

La guia s'uneix a una rampa (normalment una vara en forma de tub d'uns 5-10mm). Aquesta rampa segueix una direcció de 90⁰ respecte el terra. La rampa (o suport) dirigeix la guia per a que el coet pugi completament vertical i adquirir així la màxima altura. Un bon inici és imprescindible, ja que si el coet comença torçat es desviarà de la seva trajectòria estimada. Per això és tant important que el coet rebi una ajuda per començar recte (Figura 39).



Figura 39

Les guies del coet del treball es van fer a partir de la vara del suport. La vara té 10 mm de diàmetre, hi vaig embolicar dues capes de full blanc enganxant amb cola i vaig col·locar-les al coet formant una línia recta separades per 13 cm, recomanació del Luis de *Spain Rocketry* (Figures 40-41).



Figura 40

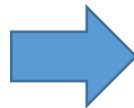


Figura 41

El suport que es va utilitzar per guiar el coet va ser fet a partir de palets amb el meu pare a un taller (Figures de 42 a 46).



Figura 42



Figura 43



Figura 44



Figura 45



Figura 46

2.11- Les aletes.

Les aletes proporcionen una estabilitat aerodinàmica al coet en el vol, de tal forma per a que el coet voli recte, i segueixi la trajectòria donada per la rampa. Solen ser fetes de plàstic, fusta de balsa, cartró o fibra de vidre. (Figura 47).

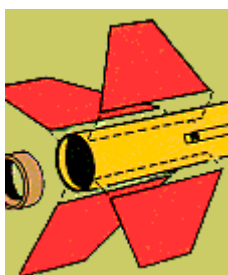


Figura 47

Per a la construcció d'aquest coet es va utilitzar fusta de balsa en les aletes, ja que és la fusta més lleugera que existeix, amb una densitat de $0,15 \text{ g/cm}^3$. Es va comprar per Amazon un paquet de 20 unitats de $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ i de gruix 2mm (Figura 48).



Figura 48

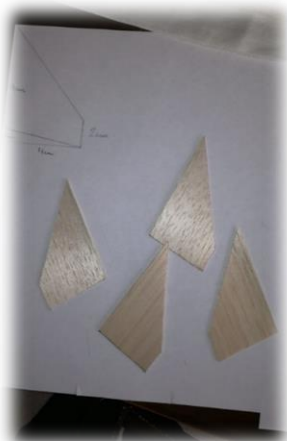
A partir d'aquestes plaques de fusta de balsa, vaig crear un model en un full i vaig guiar-me per dibuixar la forma amb les mesures indicades de cadascuna de les aletes (Figures 49-50).



Figura 49



Figura 50



Un cop ja es tenien les 4 aletes fetes, el que faltava era enganxar-les de forma simètrica al voltant del tub, és a dir que hi haguessin exactament 90 graus de separació entre cada una d'elles. Per a que això fos precís, es va dibuixar una plantilla amb la superfície o perímetre exactes del cos i es va separar en 4 línies. Així, quan aquesta plantilla envoltés el cos, s'havia de dibuixar per sobre amb llapis i marcar una línia, que seria on anirien després les aletes (Figures de 51 a 53).

Figura 51

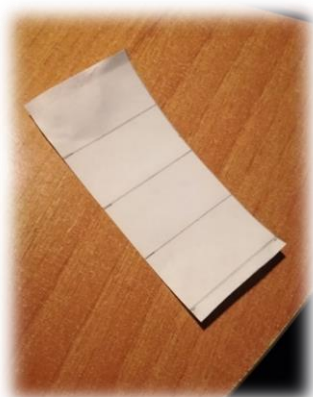


Figura 52

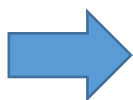


Figura 53

Per enganxar les aletes de tal forma que quedessin subjectades sense perill de trencar-se a l'hora de llançament, el Luis va recomanar comprar *Araldit Standard* de *Ceys*, un conjunt de dues coles molt potents que s'han de barrejar. Un cop barrejades, s'utilitza la cola resultant per enganxar, i esperant 12 hores queda una cola tant forta que és capaç d'aguantar 350 kg/cm^2 .

Així doncs, es va anar col·locant les aletes una a una i esperant a que la cola se solidifiqués per a que quedessin ben fixades (Figures de 54 a 56).



Figura 54



Figura 55



Figura 56

2.12- El porta motor.

El tub porta motor (Figura 57) manté el motor firmament unit al seu lloc dins del coet i l'alinea concèntricament amb la línia central del cos del coet. Consisteix en una porció de tub en l'interior del qual s'introdueix el propulsor. Aquest tub a la vegada s'ajusta a l'interior del cos del coet mitjançant dues peces en forma de cèrcols. El diàmetre d'aquests cèrcols és exacte al diàmetre interior del cos del coet.

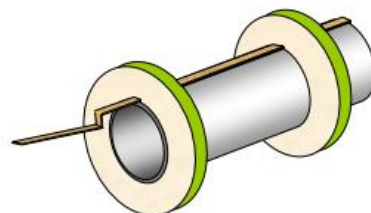


Figura 57

Tot el conjunt pot enganxar-se a l'interior del cos, quedant d'aquesta forma fix per a un sol tipus de motor, o bé pot dissenyar-se per ser intercanviable i d'aquesta manera poder utilitzar diferents tipus de motor amb el mateix model.

El propulsor finalment, un cop cremat tot i quan ja no s'impulsa més, queda retingut a l'interior del porta motor per una vareta de material flexible, com pot ser-ho el filferro. Aquest filferro el mantindrà aguantant-se fins que la càrrega d'ejecció expulsi el con.

Per fer el tub porta motor es va decidir guiar-se a partir del motor. Al cap i a la fi, com que el tub porta motor envolta aquest, han de tenir el mateix diàmetre, per això es van agafar les mateixes mesures.

A partir d'allà es va utilitzar exactament el mateix procediment que amb el cos del coet i es va començar a posar capes per sobre del porta motor per fer-lo més fort (Figures 58-59).



Figura 58



Figura 59

Un cop ja es tenia fet el paper amb la forma del motor, s'hi va fer un forat i s'hi va col·locar el filferro. Per tal que aquest filferro estigués ben subjectat s'hi va posar una anella de paper de diàmetre molt semblant a la del tub porta motor (Figures de 60 a 61).

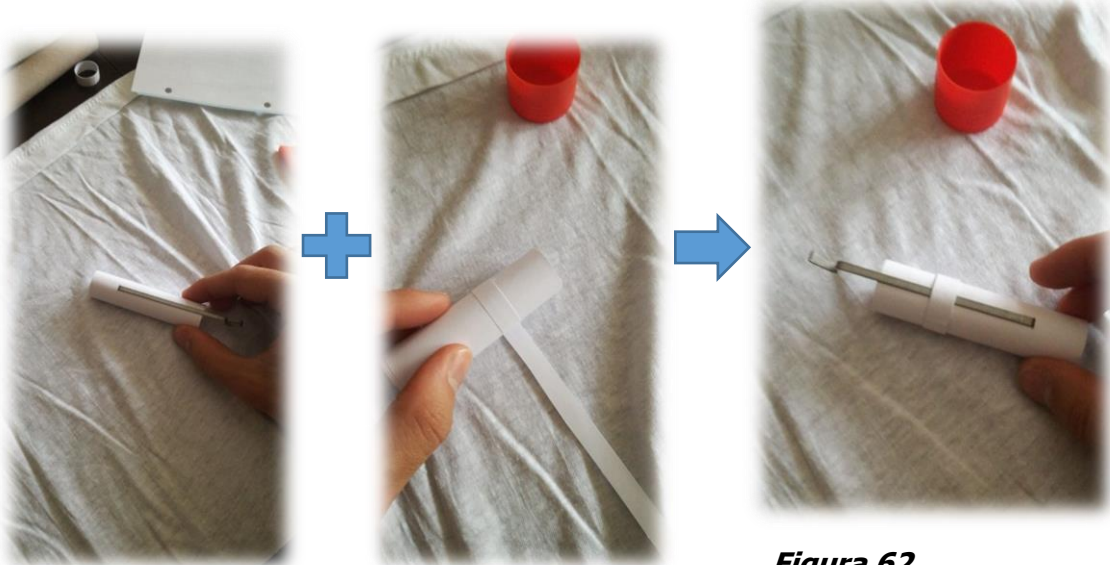


Figura 60

Figura 61

Figura 62

Finalment, es van col·locar dues anelles més (Figures 63-64) , però aquest cop aquestes eren molt més gruixudes, de tal forma que encaixessin amb el diàmetre interior del cos i fer així que el tub porta motor es quedés fixat dins del cos. Com que al tub porta motor és on s'hi troba el motor, aquest rep un impuls molt gran per part del propulsor, per tant és molt necessari que aquest estigui ben fixat i no balli. Aquesta és la raó per la que es va utilitzar *Araldit Standard*.



Figura 63

Figura 64

2.13- El motor.

El motor és la part que impulsa el coet cap amunt. Els motors es poden classificar de la següent forma:

| Classe | Impuls total (N) | Tipus de propel·lent | Tipus de motor |
|--------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| 1/4 A | de 0,312 a 0,625 | BP | SU |
| 1/2 A | de 0,626 a 1,25 | BP | SU |
| A | de 1,26 a 2,5 | BP | SU |
| B | de 2,6 a 5 | BP | SU |
| C | de 5,01 a 10 | BP | SU |
| D | de 10,01 a 20 | BP | SU |
| E | de 20,01 a 40 | BP / Compost | SU / Recarregable |
| F | de 40,01 a 80 | BP / Compost | SU / Recarregable |
| G | de 80,01 a 160 | Compost | SU / Recarregable |
| H | de 160,01 a 320 | Compost | Recarregable |
| I | de 320,01 a 640 | Compost / PVC-NOX | Recarregable / Híbrid |
| J | de 640,01 a 1280 | Compost / PVC-NOX | Recarregable / Híbrid |
| K | de 1280,01 a 2560 | Compost / PVC-NOX | Recarregable / Híbrid |
| L | de 2560,01 a 5120 | Compost / PVC-NOX | Recarregable / Híbrid |
| M | de 5120,01 a 10240 | Compost / PVC-NOX | Recarregable / Híbrid |
| N | de 1240,01 a 20480 | Compost / PVC-NOX | Recarregable / Híbrid |
| O | de 20480,01 a 40560 | Compost / PVC-NOX | Recarregable / Híbrid |

BP ve de l'anglès *Black Powder* i significa pólvora negra.

SU també prové de l'anglès *Single Use*, que significa que el motor només pot cremar una vegada, i després ja no es pot reutilitzar.

Els motors recarregables venen en un sistema diferent als SU. Venen en una carcassa metàl·lica, la qual s'anirà reutilitzant sempre, de tal forma que només es canvia la part del combustible. Això és una manera més rentable econòmicament si se sol estar acostumat a llençar un coet de forma usual. A més a partir del motor tipus H, només es pot fer així.

L'ordre de la taula indica la potència del motor, de forma creixent. Els nombres que estan col·locats a la dreta en claudàtors indiquen el diàmetre del motor.

A partir dels motors tipus H es necessita la L1, una llicència que et poden donar un cop ja has llençat coets i tens experiència. A part de la L1, tenim la L2 (a partir dels K) i la L3 (a partir dels M).

En la Figura 65 es mostra el funcionament en cada una de les etapes del vol del coet:



Per fer-nos una idea de l'empenta i l'impuls que proporciona un coet, sabem que 1Kg d'empenta equival a 9,81 Newtons. Els Kg i els N són diferents mesures per entendre la força que se li aplica a un cos. L'impuls és la quantitat de força d'empenta (Newtons) aplicada a un cos durant una quantitat determinada i finita de temps (segons).

➡ **$I = N \cdot s$**

Podem trobar l'impuls total a partir de l'empenta mitja (mitjana de tota l'empenta feta durant el temps t) multiplicada pel temps de combustió.

Impuls total = Empenta mitja · t

Per al model de coet d'aquest treball es va comprar un paquet de 6 motors D9-5 per la pàgina web *Sierrafoxbobbies*, una pàgina italiana especialitzada en models de coet que ven tot tipus de material per a construir-ne. Com que la pàgina va ser recomanada pel Luis de *Spainrocketry* podem considerar-la segura i fiable.

El motor que es va comprar té un impuls de 20N·s. Es va decidir no agafar un motor més potent pel fet de que seria pel primer llançament. Tot i així, fent una mica de càlculs amb dinàmica i cinemàtica (sense tenir en compte el fregament amb l'aire) els resultats van indicar que volaria entre 100-200 metres aproximadament (no es pot donar un valor exacte, perquè no se sap el valor del fregament amb l'aire del dia del llançament).

El motor té una empenta mitjana de 9N, tarda 2,1 segons en cremar-se tot i no és fins als 5 segons (D9-5) després de cremar-se que fa l'explosió per desprendre el paracaigudes.



Figura 67

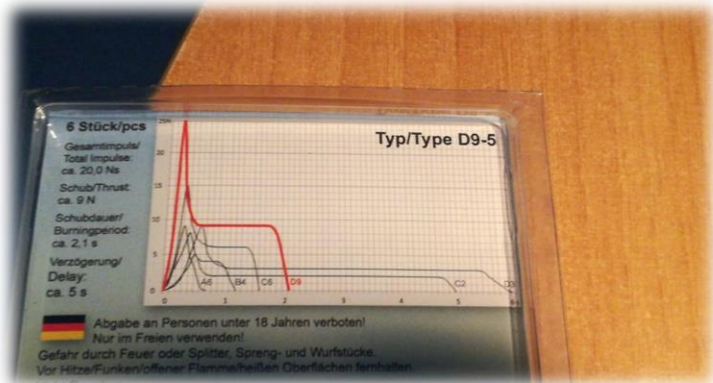


Figura 66



Figura 68

A la Figura 66 s'hi mostra la gràfica que seguirà la força del motor del coet en funció del temps, acabant a 0 en l'instant 2,1 segons.

Per conèixer la composició de la qual està fet el propel·lent es va enviar un correu a *SierraFox*, el correu on la pàgina del qual es va comprar el motor. Com a resposta es va obtenir que el propel·lent està compost per perclorat de potassi ($KClO_4$) i benzoat de sodi (C_6H_5COONa). L'únic desconegut, ja que no es va voler informar, és sobre les proporcions de cada un d'ells o de si hi ha inclòs algun additiu, que és poc probable.

En la Figura 69 es veu el motor dins del tub porta motor amb l'encenedor posat, de la forma en com es trobaria preparat pel llançament.



Figura 69

2.14- L'encenedor.

Els motors sempre són encesos elèctricament des d'una distància segura. L'encenedor (que es ven amb el motor) és un conjunt de cables que es connecten a un altre cable prim el qual està envoltat de pirogen, una substància que crema amb facilitat. Aquest cable es connecta a la tovera del motor i es queda en contacte amb el propel·lent sòlid. Un cop hi passa suficient corrent elèctric per l'encenedor, el cable prim s'escalfa fins a un punt que s'encén el pirogen. El pirogen és el que, mitjançant el foc, fa que el combustible comenci a cremar (Figura 70).

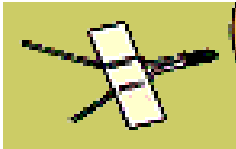


Figura 70

Afortunadament, amb el paquet que es va comprar de 6 motors, venien 6 encenedors més, un per a cada motor, de tal forma que no ens hem hagut de preocupar per construir-ne (Figures 71-72)



Figura 71



Figura 72

Per a que l'encenedor s'encengui i faci foc ha d'estar connectat a un circuit per on passi la corrent i aquest pugui cremar. Així doncs, per fer el circuit es va demanar consell al Pep Romero, un professor de tecnologia de l'escola Maristes Igualada, el qual va dibuixar un esquema (Figura 73) amb el que es va poder entendre com s'havia d'estructurar el circuit. Es va comprar el material necessari (Figura 74) per construir el circuit: Unes pinces petites de cocodril, un cable, un polsador i una pila de 9V (es van comprar dues per si una no era suficient).

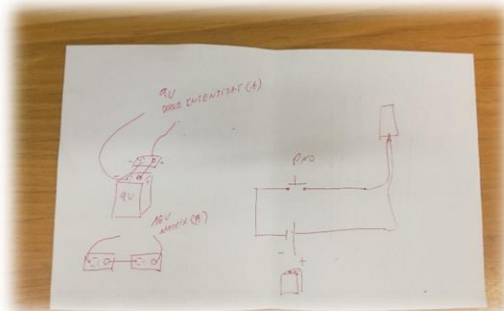


Figura 73



Figura 74

Un cop ja es tenia l'esquema i el material, es va construir el circuit i es va fer una prova amb un encenedor a l'habitació per assegurar-me que no hi hauria cap problema a l'hora del llançament. Com que hi ha 6 encenedors i l'objectiu es tractava de fer un sol llançament no passava res si se'n gastava un (Figura 75).

Afortunadament, el circuit va funcionar a la primera (Figura 76). Ara només faltava posar-ho en pràctica un altre cop al llançament, amb el motor connectat.

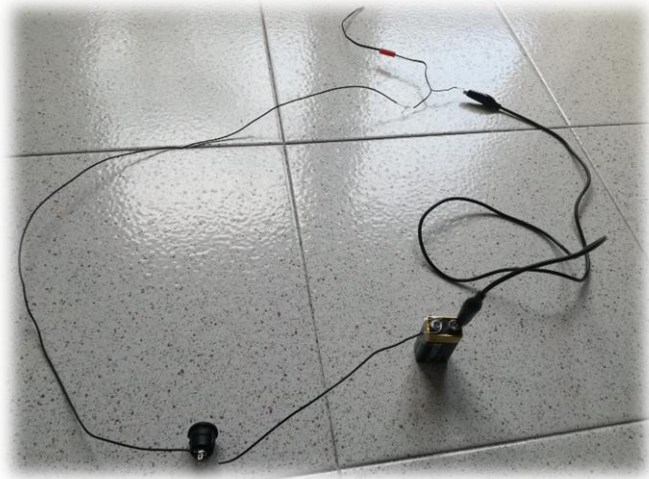


Figura 75



Figura 76

Finalment, al coet se li van pintar les aletes de color verd i se li va enganxar un adhesiu de la NASA, com a decoració per abans del llançament (Figura 77)



Figura 77

CAPÍTOL 3: L'ESTABILITAT

L'estabilitat d'un model de coet és el que permetrà un vol recte i anivellat. Aquesta es veu afectada per les posicions relatives del seu centre de gravetat (CG) i el seu centre de pressions (CP). La distància que separa aquests dos punts és anomenada el marge d'estabilitat. Un coet serà estable sempre que el CP es trobi darrere el CG. La raó per la que passa això és perquè el CG és el punt a partir del qual el coet oscil·la. Per exemple, si ens imaginem un vaixell amb el seu CG a la punta del màstil, podem estar segurs que aquest bolcarà. Per que un vaixell sigui estable, ha de tenir el CG el més proper possible a l'aigua, sota el CP, ja que és aquest punt on s'hi concentra tota la pressió que exerceix l'aigua sobre el vaixell.

En un coet passa el mateix, però al revés. El CG ha d'estar més proper al con i el CP a la cua. Així doncs, el que pel vaixell és la resistència amb l'aigua, pel coet és la resistència amb l'aire. En el cas del vaixell, la pressió ve de sota i en el cas del coet la pressió ve d'amunt, per això en el coet és a l'inrevés que en el vaixell (Figura 78)

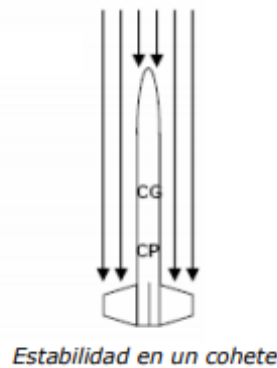
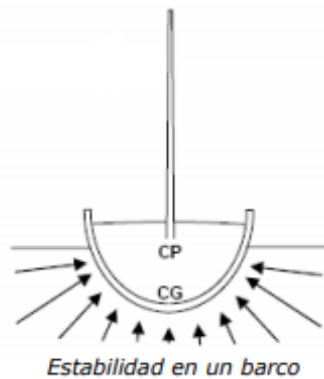


Figura 78

És recomanable establir un marge d'estabilitat dues vegades el diàmetre del coet. Aquests són tots els conceptes que participen en l'estabilitat:

Centre de gravetat

El centre de gravetat d'un coet es pot trobar de forma senzilla. Com que el CG és el punt exacte en el que l'estructura està equilibrada en massa, es pot buscar amb un simple test de balanceig.

Centre de Pressions

Trobar el CP és molt més difícil i requereix de molt més treball per poder determinar-lo. Com que aquest coet viatjarà a una velocitat subsònica, s'utilitzarà el mètode que va desenvolupar James S. Barrowman. Aquest mètode es basa en dividir el coet en cadascuna de les seves parts, analitzar-les individualment, simplificar els càlculs i equacions i combinar tots els resultats per obtenir-ne un de final.

Angle d'atac

També tenim l'angle d'atac, l'angle que forma l'eix longitudinal respecte la direcció del vol (perpendicular al terra). Es representa mitjançant el símbol α . La direcció del vol es representa amb el vector velocitat del coet, que apareix a partir del CG (Figura 79).

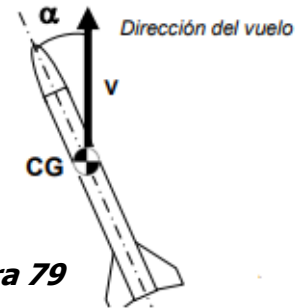


Figura 79

Força d'arrossegament (F_D)

La F_D és la força aerodinàmica que actua directament sobre el CP i en sentit contrari a la direcció del vol.

Aquesta força de fregament és causada tant per l'arrossegament amb l'aire com per la pressió atmosfèrica que hi ha en la terra. La seva intensitat dependrà de la superfície de la secció transversal (un tall de 2 dimensions en una figura de 3 dimensions paral·lel a la base) del coet que xoqui amb l'aire. (Figura 80).

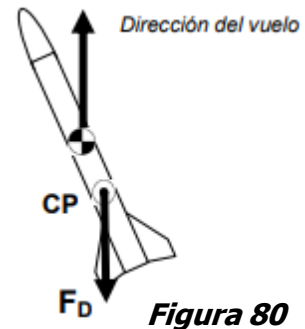


Figura 80

Força Normal ($F_{N\alpha}$)

La força normal actua sobre el CP de forma perpendicular a l'eix longitudinal del cos. És la resultant de totes les forces aerodinàmiques que actuen sobre el coet i és la responsable de que el coet giri i no vagi en direcció perpendicular al terra. Així, es genera un moment (quantitat de moviment) de gir (Figura 81).

Aquesta força tracta de reduir l'angle d'atac, fent oscil·lar el coet. Sobre les fórmules d'aerodinàmica es troba que per un angle d'atac major, la $F_{N\alpha}$ serà més gran. Això segueix la seva lògica, ja que si α és elevat, la força normal necessitarà compensar proporcionalment per estabilitzar el coet. El cas en el que la força normal és màxima és quan l'angle d'atac és 90° i mínima o quasi nul·la amb un α molt proper a 0° .

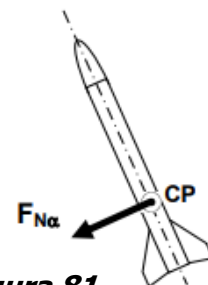


Figura 81

Moment de gir (M)

El moment de gir és la tendència del coet per moure's al voltant del seu CG. S'aconsegueix com a resultat de multiplicar la força normal que actua sobre el CP pel marge d'estabilitat en un instant precís del vol (ja que la $F_{N\alpha}$ varia segons la posició del coet respecte la direcció del vol, i durant el vol aquesta posició va variant). En la Figura 82 es mostra com afecta M a la posició del coet.

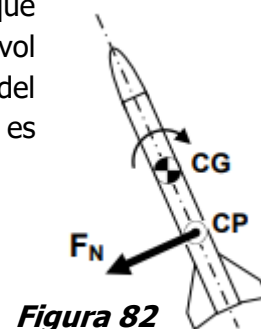


Figura 82

Moment d'inèrcia (p)

En un sistema inercial, en el qual el moment lineal es conserva, se li denomina moment d'inèrcia a aquella quantitat de moviment que conté el sistema en un instant determinat. És una magnitud vectorial i es troba amb la massa i la velocitat del cos en un moment precís:

$$\vec{p} = m \vec{v}$$

A la variació de quantitat de moviment se li denomina impuls (**I**).

L'empenta

L'empenta és la quantitat de força necessària per poder elevar el cos. Es mesura amb Newtons (N). Un N és la quantitat de força necessària per proporcionar una acceleració d'1 m/s² a 1 kg de massa.

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Com que el pes és la força exercida per la gravetat sobre un cos en la superfície d'un planeta, el Newton també és considerat com a unitat per la força pes. Aleshores, a la Terra, una massa d'1kg té una empenta de 9,81 N → $F = m \cdot g$

L'impuls

És la quantitat de força aplicada en un interval de temps. Es mesura en Newtons multiplicat per segons (N·s). → $I = F \cdot \Delta t$

L'impuls també es pot expressar com la variació de quantitat de moviment.

$$\rightarrow I = m \cdot \Delta v$$

3.1- Moviments del coet durant el vol

3.1.1- Moviment de translació

És aquell moviment en el que el coet es desplaça d'un costat a l'altre, cap a munt o cap a baix, i el coet apunta sempre a la mateixa direcció. Està relacionat amb l'alçada que agafarà durant el vol. És determinat per les forces que actuen sobre el CG: El pes, l'empenta del motor i la resistència amb l'aire (Figura 83).

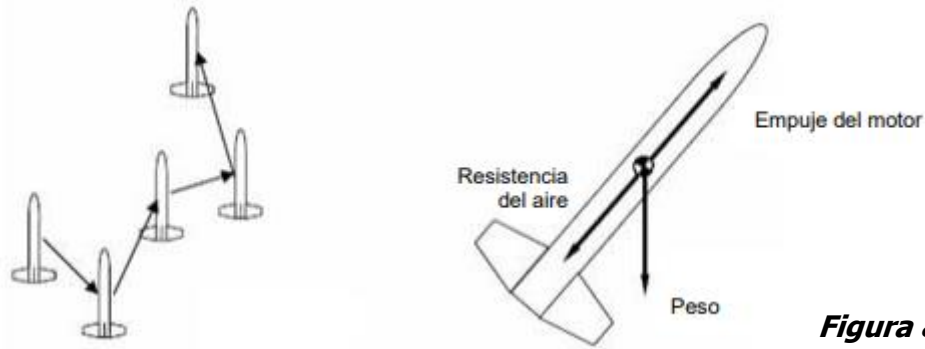


Figura 83

3.1.2- Moviment de gir

És aquell en el qual el coet gira al voltant del seu propi eix, que serà sempre el seu CG. En aquest tipus de moviment, el coet apunta a diferents direccions durant el vol. Aquest moviment és condicionat per les forces que actuen perpendicularment sobre el CG, que ho són especialment les de l'aire (Figura 84).

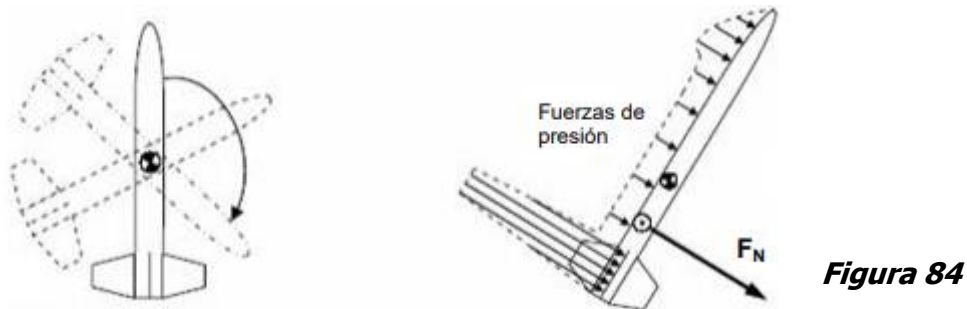


Figura 84

3.1.3- Moviment de rotació

Aquí el coet gira al voltant del seu eix longitudinal. Aquest moviment és degut a les forces aerodinàmiques que actuen sobre les aletes del coet. Si les aletes no estan ben orientades o alineades, pot provocar com a conseqüència que el coet giri com una baldufa (Figura 85).

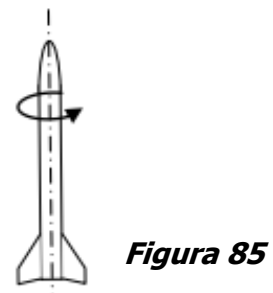


Figura 85

3.2- Com aconseguir un sistema estable

Com ja s'ha comentat anteriorment, un coet necessita tenir el CP per darrere del CG per trobar-se de forma estable.

Sobre el CP hi actua la Força Normal, que és la que intenta corregir l'angle d'atac per a que sigui el mínim possible. Així doncs, si el marge d'estabilitat és el suficientment ample, el CP no arribarà a sobrepassar el CG. El moment de gir degut a la Força Normal sempre serà major al costat de les aletes que del con. Això es tradueix amb una correcció per obtenir un angle d'atac menor. En aquest cas es diu que el model oscil·la positivament (Figura 86).

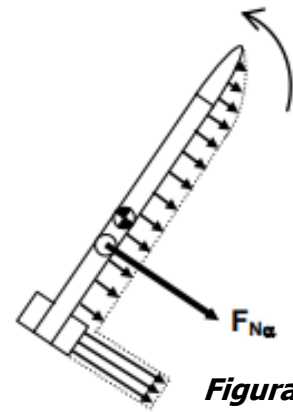


Figura 86

En un altre cas, si el marge d'estabilitat és molt reduït, el CP i el CG poden arribar a coincidir, i el moment de gir serà inexistent com a conseqüència. El desplaçament del coet serà neutral. En altres paraules, no empitjorarà la seva posició però tampoc la corregirà (Figura 87).

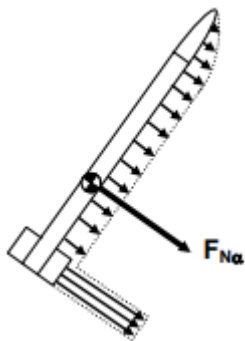


Figura 87

Finalment, si el marge d'estabilitat és insuficient o contrari a com hauria de ser, trobarem el CP per sobre el CG. Aquest és el pitjor dels casos, ja que la força normal exercida sobre el CP s'efectuarà en la zona més propera del con que de les aletes. Això farà que augmenti l'angle d'atac i que per consegüent el coet perdi el total de la seva estabilitat. Aquí es diu que el coet oscil·la de forma negativa (Figura 88).

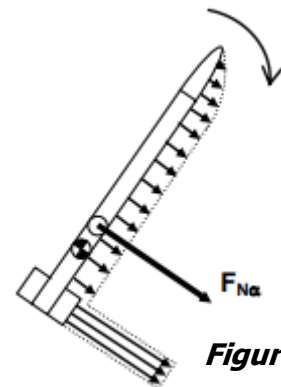


Figura 88

En la següent imatge (Figura 89) s'hi presenta un esquema d'un coet estable corregint la seva direcció durant el vol.

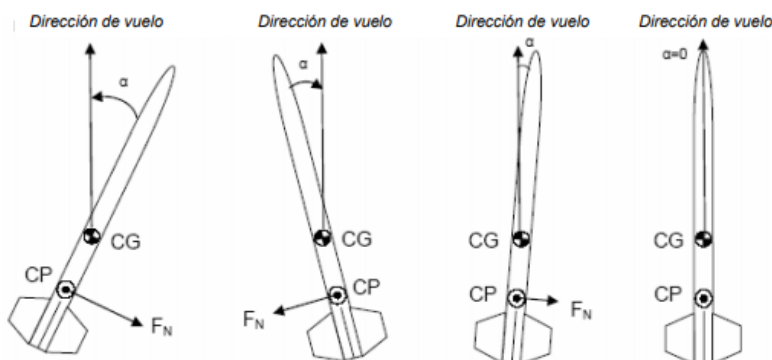
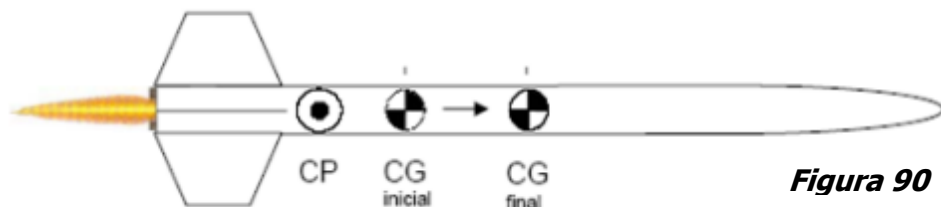


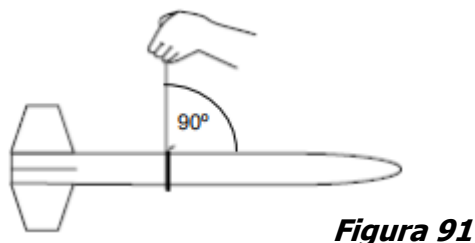
Figura 89

També s'ha de tenir en compte que el CG varia a mesura que el vol avança, ja que el coet perd el pes que tenia anteriorment pel combustible del motor ja cremat (Figura 90). No obstant, no cal preocupar-s'hi per això, ja que la variació sempre va a favor nostre. El CG es desplaçarà cap amunt, en sentit del con.



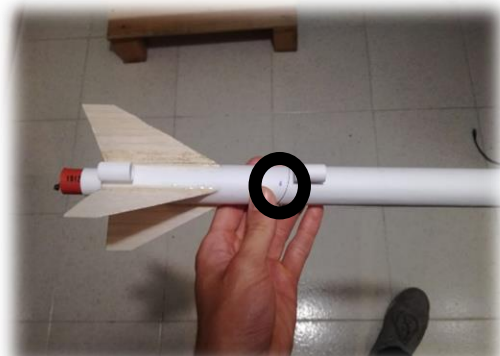
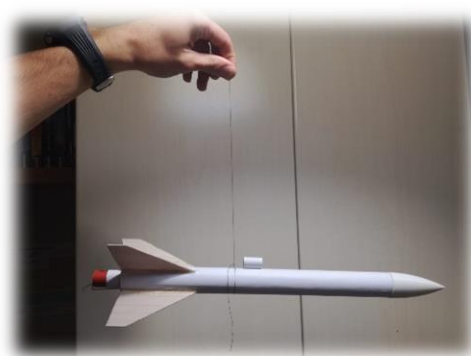
3.3- Localització del Centre de Gravetat (CG)

El mètode per trobar el CG d'un model de coet es pot fer de la següent forma: Agafar un cordill i passar-lo pel voltant del cos del coet. Agafar el cordill des de l'extrem i situar-lo al lloc del cos en el que el coet es quedi totalment anivellat (Figura 91).



El CG s'actualitzarà segons el tipus de motor o paracaigudes que s'utilitzi. Un cop fet el llançament, quan es canviïn aquests (el paracaigudes si escau, no caldrà sempre), s'haurà de tornar a mirar on es localitza el centre de gravetat.

Per localitzar el centre de gravetat del meu coet vaig utilitzar aquest mètode. Es va preparar com si estigués llest pel llançament, amb tots els components inclosos, ja que necessitava saber exactament quin anava a ser el seu CG durant el vol.



Un cop es va haver trobat quin era el punt on el coet es quedava totalment horitzontal es va marcar amb un cercle de color blau, deixant marcat que allà era on s'hi trobava el CG (Figures 92-93).

3.4- Localització del Centre de Pressions (CP)

La localització del CP és bastant més complicada que pel CG. Hi ha diverses formes per trobar-lo, algunes poc precises i més senzilles i d'altres més complexes però més clares alhora.

La més complexa, però a l'hora més precisa, és sotmetre al coet a unes proves en un túnel de vent.

La forma més fàcil, però com a conseqüència també més imprecisa és la coneguda com "Retall en cartró". Aquest mètode consisteix en retallar la silueta del coet sobre un cartró rígid. Col·loquem un regle o un llapis sota la silueta com si fes de balança. El punt en el qual s'equilibri aquest tros de cartró representarà el CP (Figura 94).

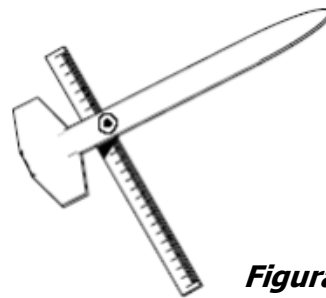


Figura 94

Després tenim un altre mètode, també molt precís, que s'ajuda gràcies a la utilització de les equacions de Barrowman, que consisteix en dividir el coet en les seves parts, calcular amb una sèrie d'equacions els seus Centres de Pressions i després sumar-les totes obtenint així la total del coet. Aleshores, aquestes equacions es calculen per separat i seguint aquest ordre:

- El con (n).
- El suport cònic (cs), que en aquest model de coet no serà necessari calcular-lo, ja que no n'hi ha.
- Les aletes (f, fb).

Quan tinguem tots els resultats, finalment els combinarem per trobar el CP i la distància X des de l'extrem superior del con fins on està localitzat el CP.

En aquestes equacions hi intervenen molts paràmetres, així que amb la Figura 95 es pretén concentrar-los, que quedarà més clar:

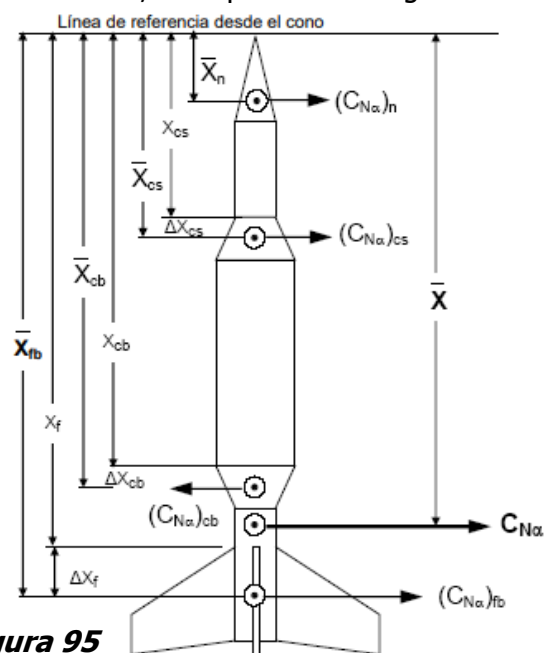


Figura 95

n= con

cb= suport cònic posterior

cs= suport cònic davanter

f= aleta

fb= aletes enganxades al cos

El suport cònic davanter i el suport cònic posterior no formaran part d'aquest model de coet, així que no caldrà preocupar-se per calcular-los.

Les equacions que utilitzarem a continuació, per trobar el CP i $C_{N\alpha}$ van ser derivades per Barrowman en el seu moment a partir del càlcul matemàtic. Aquí no es faran les demostracions d'aquest càlcul, sinó que simplement s'hi presenten les equacions i es fa ús d'elles per al propi model de coet.

3.4.1- Localització del CP del con

Per a un con en forma d'ogiva tenim la següent equació:

$$\bar{X}_n = 0.466 \cdot L$$

On L és l'altura del con en posició vertical en la Figura 96

El meu con té una altura de $L = 7$ cm (treballarem en tots els càlculs amb unitats cm, ja que el resultat serà més fàcil d'interpretar si surt amb cm), per tant:

$$[X_n = 0,466 \cdot 7 = 3,262 \text{ cm}]$$

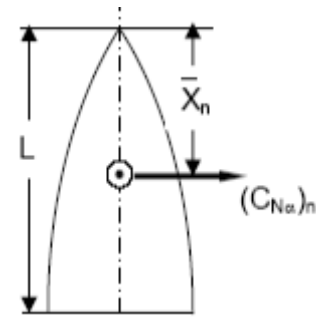


Figura 96

3.4.2- Localització de la força normal en el con

En general, la força normal que se li aplica al con és la mateixa per a tot tipus de formes:

$$[(C_{N\alpha})_n = 2 \text{ N}]$$

3.4.3- Localització de la força normal en les aletes

Les aletes s'estudien de forma conjunta (en comptes d'una a una) i en presència del cos, és a dir, quan estan agrupades al voltat d'aquest.

Factor d'interferència en les aletes: La força normal de les aletes $(C_{N\alpha})_{fb}$ està influenciada per l'aire que passa per la superfície d'aquestes i per la secció del cos a la qual estan unides. A aquesta influència se la denomina Factor d'interferència, K_{fb} , i s'ha de tenir en compte quan es calcula el CP de les aletes.

El factor d'interferència per a quan s'utilitzen 3 (mínim), 4 o 5 aletes és el següent:

$$K_{fb} = 1 + \frac{R}{S + R}$$

El factor d'interferència per a 6 aletes és:

$$K_{fb} = 1 + \frac{0.5 \cdot R}{S + R}$$

On (per a les dues equacions) R és el radi del cos del coet i S és la distància des del punt més allunyat de l'aleta fins a tocar el cos. Amb la següent imatge (Figura 97) s'entendran millor els conceptes.

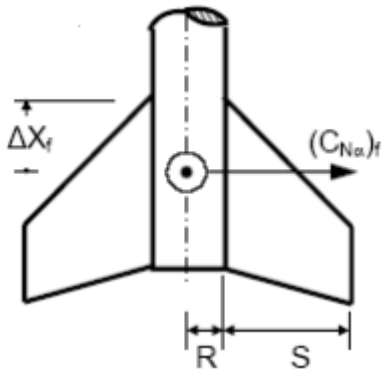


Figura 97

Com que per a aquest coet s'han utilitzat 4 aletes, hem d'utilitzar el primer factor d'interferència de la següent forma:

Les aletes tenen una S de 4 cm (mostrat en la Figura 51), i el tub té un R de 1,35 cm. Així doncs, substituint a la fórmula del factor d'interferència, tenim que:

$$\left(K_{fb} = 1 + 1,35 / 5,35 = 1,25 \text{ cm} \right)$$

Però això encara no s'ha acabat aquí, ara hem de calcular la força normal que es dona sobre les aletes.

La força normal exercida en les aletes, sense Factor d'interferència, segons el nombre d'aletes, és:

$$(C_{Na})_f = \frac{4 \cdot n \cdot \left(\frac{S}{d} \right)^2}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot k}{a + b} \right)^2}}$$

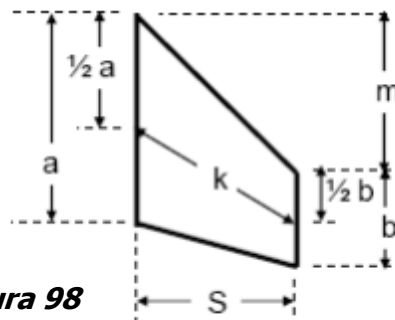


Figura 98

On **n** és el nombre d'aletes (4) i **d** és el diàmetre del cos en el qual s'hi ubiquen (2,7 cm), mostrats en la Figura 98. El valor de **m** pot ser trobat restant-hi **b** a l'altura de tota l'ala. Així, tenim que **m** = 7 cm. Els paràmetres **a** i **b** estaven descrits en la Figura 51, però **k** (distància diagonal des de 1/2 a fins a 1/2 b) es va haver de mesurar amb trigonometria de la següent forma:

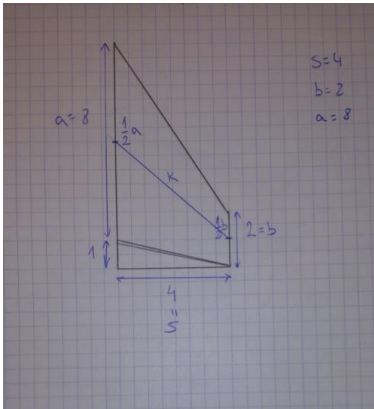


Figura 99

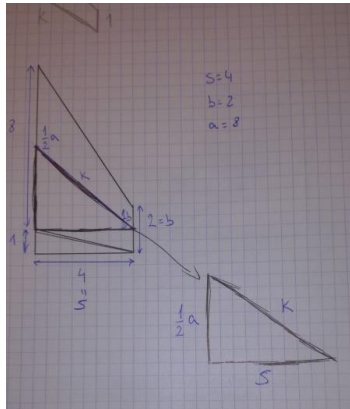


Figura 100

Tenint el problema plantejat (Figures de 99 a 101) i tots els paràmetres identificats s'extreu un triangle que relacioni el paràmetre inidentificat **k**. Al fer això, es veu que es pot aplicar el teorema de Pitàgores i trobar així la **k**. La **k** dona un resultat de 5,657 cm.

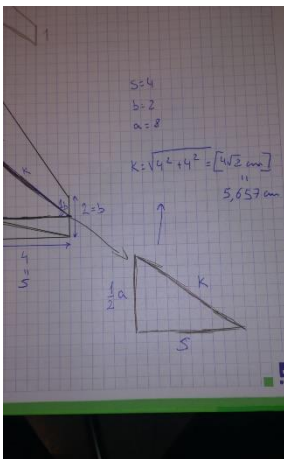


Figura 101

Així doncs, quan ja tenim tots els valors simplement s'han de substituir a la fórmula els paràmetres:

$$\left[(C_{N\alpha})_f = [4 \cdot 4 \cdot (4/2,7)^2] / 1 + \sqrt{(1 \quad | + [(2 \cdot 5,657)/(10)]^2)} = 35,1166/2,51 \quad 13,99 \approx 14N \right]$$

Finalment, la força normal de les aletes, en presència del cos és:

$$(C_{N\alpha})_{fb} = K_{fb} \cdot (C_{N\alpha})_f$$

$$\left[(C_{N\alpha})_{fb} = 1,25 \cdot 13,99 = 17,48 N \right]$$

3.4.4- Localització del CP en les aletes

Ara, per localitzar el CP de les aletes ens regirem per la següent fórmula, que indica la posició de les aletes en la que s'hi concentra la pressió:

$$\bar{X}_{fb} = X_f + \frac{m(a+2 \cdot b)}{3 \cdot (a+b)} + \frac{1}{6} \cdot \left[a + b - \frac{a \cdot b}{a+b} \right]$$

On X_f és la distància des de l'extrem superior del con fins la part superior de les aletes, la qual per al cas del meu coet val $X_f = 28,9$ cm.

Per tant, si substituïm els valors a la equació tenim que:

$$\left[X_{fb} = 28,9 + (84/30) + (8,4/6) = 33,1 \text{ cm} \right]$$

Per tant, el punt 33,1 cm (començant des del con i baixant) del coet és el punt exacte on si concentra el CP de les aletes i, per tant on s'hi concentra i actua la força normal de les aletes.

3.4.5- Combinació de càlculs

Doncs un cop ja tenim tots els valors que necessitàvem, ara s'han de combinar tots els càlculs per finalment obtenir el valor de la Força Normal d'Arrossegament de tot el model i veure la posició del CP, el punt en el que aquesta força s'hi concentra.

La força normal en tot el model de coet, C_{Na} , és el sumatori de totes les forces normals en les seves parts:

$$C_{Na} = (C_{Na})_n + (C_{Na})_{cs} + (C_{Na})_{cb} + (C_{Na})_{fb}$$

$$\left[C_{Na} = 2 + 17,48 = 19,48 \text{ N} \right]$$

Aquesta serà la força que s'hi exercirà sobre el coet per corregir qualsevol tipus de desviament. Si per qualsevol cas s'hi exercís una força superior de 19,48 N per part del vent sobre el coet, aquest es desviaria i perdria el rumb.

I la posició pel CP es calcula de la següent forma:

$$\bar{X} = \frac{(C_{Na})_n \cdot \bar{X}_n + (C_{Na})_{cs} \cdot \bar{X}_{cs} + (C_{Na})_{cb} \cdot \bar{X}_{cb} + (C_{Na})_{fb} \cdot \bar{X}_{fb}}{C_{Na}}$$

$$\left[X = [(2 \cdot 3,262) + (17,48 \cdot 33,41)] / 19,48 = 30,31 \text{ cm} \right]$$

En aquest punt (marcat amb una **X** sobre el con del coet en la Figura 102) és on s'hi concentren totes les forces exercides per la pressió atmosfèrica i el vent quan el coet s'enlaira. A més, aquí és des d'on partirà la força normal per corregir la trajectòria del coet.

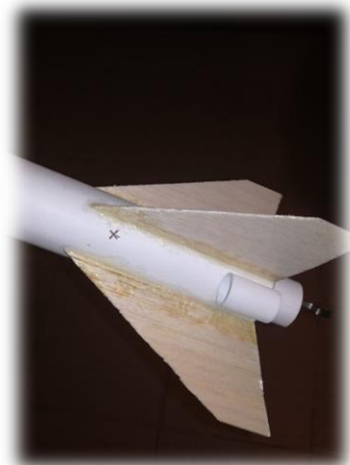


Figura 102

3.5- Conclusions en estabilitat

Un cop tinguem coneixement sobre el CP i el CG, s'han de valorar els resultats i és que no tots valen, ja que el marge d'estabilitat (la distància que separa d'aquests dos punts) ha de trobar-se pel voltant de dues vegades el diàmetre del tub del model de coet. En la Figura 103 s'hi mostra marcat amb un punt blau el CG i amb una creu el CP. En calcular amb regle el marge d'estabilitat, surt que aquest val 5,5 cm, el qual, al ser dividit pel diàmetre del tub, que és 2,7 cm dóna un resultat molt proper a 2, justament el que es demana per a que un coet sigui estable (demostrat a la Figura 104).



Figura 103



Figura 104

També és imprescindible que el CP es trobi per darrere del CG, sinó el coet giraria a la direcció oposada sempre que s'enlairés. Com ja s'ha comentat anteriorment, el CG varia durant el vol, ja que el motor perd massa a mesura que crema. No obstant això, aquest és un fet que mai ha de preocupar ja que el CG es desplaça cap a munt, i això és beneficiant per nosaltres, perquè fa augmentar el marge d'estabilitat.

Finalment, es va calcular la massa total del coet, i aquesta va resultar 82 grams (Figura 105), un nombre molt petit i molt satisfactori tenint en compte la potència del motor, fent que aquest pogués elevar-lo sense dificultat i amb gran acceleració.



Figura 105

CAPÍTOL 4: EL LLANÇAMENT

Per fer el llançament de forma segura, sense molestar i amb espai suficient per a la consegüent caiguda, es va anar als plans de la Tossa, un lloc apartat i abandonat, on no hi circulaven cotxes. És un espai habilitat per fer volar *drons* i avions petits, com d'aproximadament 1.5 metres de longitud. Per veure un mapa geogràfic del lloc detalladament, cal anar a Annexos (Imatge 1).

Per a que un llançament es dugui a terme correctament, s'hi ha de col·locar el suport sobre una superfície plana, la qual no es pugui malmetre pel foc que desprengui el motor a la sortida. La Figura 106 mostra el coet just abans del llançament, un cop pintat i amb l'adhesiu ja col·locat.



Figura 106

Seguidament, s'hi connecta el circuit de la forma que és explicada més amunt i al premer el polsador, el motor s'encendrà i farà pujar el coet cap amunt (per veure el vídeo del muntatge del circuit, cal anar a Annexos – Vídeo 1).

El llançament del coet va ser un èxit rotund, va accelerar molt ràpid i va pujar molts metres (per veure vídeos del llançament, cal anar a Annexos – Vídeo 2, on hi ha un recull des de diferents perspectives). L'inconvenient que s'hi va trobar és que, la pujada observable va ser vertical i es va perdre entre els núvols, per la qual cosa no es va poder filmar i no es va poder observar la caiguda, ni com, ni on baixava i va presentar molta dificultat trobar-lo. A la tarda del mateix dia es va anar a fer una recerca exhaustiva per la zona amb l'objectiu de no marxar fins que no es trobés el coet. S'hi havia preparat mapes (Annexos - Imatge 1) senyalant-hi totes les possibles àrees on podia haver anat a parar el coet pel vent. Afortunadament, el coet es va recuperar amb gairebé el 100% de les parts que el componien. El coet es va trobar de la següent forma:



Figura 107

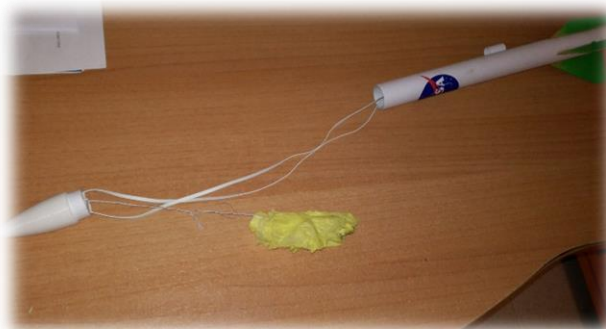


Figura 108

Per la pròpia imatge, es pot extreure informació sobre la caiguda, ja que com que aquesta no es va poder observar, s'havia d'intentar descobrir si el paracaigudes es va obrir. En les Figures 107-108 es pot veure que aquest no es va obrir, ja que no estava desplegat de la forma que ho hagués hagut de fer, i seguia tal i com s'havia col·locat. Essent inspeccionat més detingudament a casa, es va veure que el paracaigudes s'havia cremat per l'explosió del motor (la Figura 109 ho demostra molt bé). Al cremar-se el paracaigudes, com que aquest era de plàstic, es va fondre i es va enganxar, impossibilitant així la correcta obertura d'aquest.

A part, també es van trencar dues de les quatre aletes del coet, segurament no només per la fragilitat de la fusta de balsa, sinó també pel fort impacte contra el terra que no va poder evitar el coet a causa que el paracaigudes no es va obrir (Figura 110).



Figura 109



Figura 110

CONCLUSIONS

L'objectiu del treball s'ha assolit plenament. Les conclusions fonamentals derivades del treball són:

- * Primer, el coet tenia alguns matisos a perfeccionar. Després d'haver realitzat el llançament es pot cloure que hi havia coses millorables.
- * Un cop s'ha vist l'estat en el que el paracaigudes es trobava, es pot treure una hipòtesi: Pot ser que el fet que el paracaigudes no s'obris fos perquè el paper ignífug no resistís amb suficient força l'explosió rebuda pel motor. Ara bé, per corroborar aquesta hipòtesi, caldria fer un altre llançament amb les mateixes condicions exactes a les del primer llançament, però col·locant 3 o 4 tires més de paper de forn. Així, podríem observar què passa en el llançament, i en cas que el paracaigudes s'obris, podríem verificar la hipòtesi. Les raons per les que s'ha triat aquesta hipòtesi és pel fet de que el paracaigudes està cremat per la zona on rep l'explosió del motor. Aquesta explosió devia sobrepassar la protecció que oferien les tires de paper de forn i va arribar fins el paracaigudes. El paracaigudes, a l'estar fet d'un material plàstic i cremar-se, es va fondre. Aquests tipus de materials, quan es fonen adapten una consistència modelable i perden la seva estructura inicial. Però com que se solidifiquen molt ràpidament, el paracaigudes del coet es va enganxar sobre ell mateix, impeding l'obertura d'aquest.
- * Les aletes trencades són conseqüència de la caiguda lliure del coet i l'impacte.
- * A més d'enlairar el coet, un dels objectius era que aquest no es desviés d'una trajectòria recta o gairebé recta (ja que totalment recta és impossible).
- * Una altre objectiu era aconseguir el desplegament del paracaigudes, per tal de aconseguir un aterratge més suau. Aquest objectiu no ha estat assolit. Tot i així, s'ha pogut fer una hipòtesi sobre les raons per les quals el paracaigudes no es va obrir, cosa que permetrà en el proper vol millorar l'estructura com ja s'ha explicat abans.
- * Quedava com objectiu calcular l'alçada màxima del coet utilitzant la filmació, un sistema de referència i la trigonometria. Aquest objectiu, en el moment que el coet es va enlairar per damunt dels núvols va quedar descartat.
- * Finalment afegir una darrera constatació, i és que dedicar temps en construir un coet és complicat, però el fet de veure com s'enlairava a tal velocitat i arribava a passar els núvols, fa que valgui la pena tots els esforços i suor posats en el treball.

FONTS DOCUMENTALS

1. *Building a Model Rocket – Introduction.* <<https://www.instructables.com/id/Building-a-Model-Rocket-Introduction/>>.[12-08-2019]

D'aquesta pàgina s'han extret mètodes per aprendre a construir el coet (Capítol 2).

2. *Análisis aerodinámico y estructural para el diseño y fabricación de un cohete de 700 Newton de empuje.* Bogotá. Treball de fi de carrera. Universitat de San Buenaventura, 2009.<<http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/66264.pdf>>.
[3-07-2019]

D'aquest document s'ha pogut extreure tota la informació sobre els cons dels coets.

3. VAN MILLIGAN, Tim. *How to Design & Build Engine Mounts.* Colorado Springs. Apogee Rockets,2003.
<<https://www.apogeerockets.com/education/downloads/Newsletter104.pdf>>.
[27-08-2019]

Aquest document va resultar essencial per aprendre quin és el mètode ideal per a la construcció d'un porta motor.

4. *Modelisme espacial.* Viquipèdia.<https://ca.wikipedia.org/wiki/Modelisme_espacial>.
[11-07-2019]

D'aquí es va aconseguir la taula dels tipus de motors.

5. BARROWMAN, James; et al. *The Theoretical prediction of the center of pressure.* ApogeeRockets,1966.
<https://www.apogeerockets.com/downloads/PDFs/barrowman_report.pdf>.
[18-07-2019]

D'aquest .pdf es va poder extreure informació sobre les funcions del Centre de Pressions.

6. RECUENCO, Jesús Manuel. *Modelismo Espacial.* Tripoli Spain, 2008.
<http://www.tripoli-spain.org/tripoli/reportajes/Modelismo%20Espacial%20R6_Octubre_2008.pdf>.
[10-09-2019]

Aquest document es va utilitzar per tot l'apartat d'estabilitat (Capítol 3), i es van utilitzar les fórmules que s'hi mostren per aplicar-les al nostre model de coet.

ANNEXOS

Imatge 1:



Figura 111

En la Figura 111 s'hi mostra el punt des d'on es va llençar el coet (marcat de color vermell) i el punt exacte on es va trobar el coet a la tarda després d'haver-se perdut (marcat de color verd). Va fer una desviació de 100 metres respecte el punt de llançament.



Figura 112

La Figura 112 és una ampliació de la Figura 111, que mostra el mateix punt on es va trobar el model de coet. La fletxa vermella indica el punt des d'on va ser llançat el coet, malgrat veure's molt dèbilment.

Vídeo 1:

Link del muntatge del circuit en vídeo a càmera ràpida:

<https://drive.google.com/open?id=1jirK6efVlfUocqOB_k5Q0BTCqInW6zzG>

Vídeo 2:

Link del recull de vídeos del llançament des de diferents perspectives:

<https://drive.google.com/open?id=1L_rFGYv9xqjbXEJ-NOEBcjrDIUuYj5YV>