

EL COET ESPACIAL IDEAL

TREBALL DE RECERCA 2016



· Autor: Ferran Craven-
Bartle Corominas

· Tutora: Maria-Cristina
Rafecas Mestre

· Grup: 1^{er} / 2^{on}
Batxillerat B

· Lloc: Barcelona,
2016

AGRAÏMENTS

M'agradaria que aquestes paraules reflecteixin la gratitud que tinc envers totes aquelles persones que han estat implicades directa o indirectament amb aquest treball, en especial la tutora i professora d'aquesta investigació Cristina Rafecas Mestre, qui m'ha guiat i donat suport en tot moment durant el transcurs d'aquest projecte.

També vull donar les gràcies a la meva família i amics, en especial al meu pare, els quals s'han interessat en tot moment per aquesta recerca i m'han animat a seguir treballant.

I per últim, però no menys important, agrair a totes aquelles persones que m'han ajudat amb la part pràctica d'aquest treball i hi han dipositat el seu gra de sorra per fer possible aquest Treball de Recerca.

ÍNDEX

1. ABSTRACT	3
2. INTRODUCCIÓ.....	4
3. COS DEL TREBALL.....	5
3.1 CONCEPTES INTRODUCTORIS	5
3.1.1 Enginyeria aeroespacial.....	5
3.1.2 Carrera espacial històrica	6
3.1.3 Modelisme espacial	10
3.1.4 Parts bàsiques d'un coet	12
3.2 CONCEPTES FÍSICS.....	13
3.2.1 La Gravetat	13
3.2.2 Conceptes bàsics en el vol d'un coet.....	15
3.2.3 El vol i la estabilitat.....	16
3.2.3 Ubicació del Centre de Gravetat i Centre de Pressions.....	20
3.3 EXPERIMENT: UN COET D'AIGUA I AIRE A PRESSIÓ	21
3.3.1 Construcció.....	21
3.3.1.1 Construcció del coet i de la plataforma de llançament.....	22
3.3.1.2 Problemes a l'hora de construir i solucions pertinents	26
3.3.2 Primers llançaments i problemes pertinents.....	29
3.3.3 Llançaments mesurats junt als càlculs pertinents.....	33
3.3.4 Conclusions de la part experimental	49
4. CONCLUSIONS DEL TREBALL	50
5. BIBLIOGRAFIA	52

1. ABSTRACT

This work is divided into two large parts: the first one is the theoretical part, where general concepts about aerospace engineering and its differences between aeronautical and astronautics engineering are explained and defined. There are also some historic facts about the space race from 1895 (the first engine that consumes liquid fuel) to the present (the last space companies who have recently been introduced in the space industry) and some explanation about spatial modeling and its divulgation all around the world.

After that, some physical and mathematical concepts about rockets flights come to understand better their movement. These notions are gravity, the principal force in flights, Gravity Center and Center of Pressure and their location equations, which will determine the stability of the rocket, and more concepts like thrust, torque etc.

The objective of the project is to answer and ascertain the main question of the work, the hypothesis: “Which elements will determine the perfect flight of a rocket?”. As we have assumed in the theoretical part, the flight of a rocket will be stable as long as the following four requirements are met:

- 1- The location of the Gravity Center has to be more advanced than the location of the center of pressure, this is to say, the Gravity Center must be located in the cone of the rocket, while the Pressure Center must be in the tail.
- 2- The stability margin should be as broad as possible.
- 3- Lateral wind along with weather conditions on the day of the release should be the smoothest possible.
- 4- The rocket must have the essential parts: a curved or pointed cone at the beginning of the rocket and 2 or more fins on the tail.

Once the theoretical part has been explained, statements have to be checked and see, with a practical experiment, their validity. Because of that, the second part of the project, better known as practical part, consists of the construction and launching of a water rocket and a study of its movement and path, compared with real rockets.

2. INTRODUCCIÓ

Per començar cal remarcar que aquest treball té la intenció de ser de caire científic i tècnic, i, per tant, pretén ser també un treball objectiu i denotatiu. Dit això, aquest treball consta de dos parts principals que constitueixen el cos del treball: una primera part d'àmbit més teòric, on s'expliquen coneixements generals de física, enginyeria aeronàutica i història espacial que són previs a la part que vindrà després i enfoquen al lector en el tema que s'està tractant, a part d'introduir conceptes nous que ajudaran al lector a comprendre millor el treball; i una segona part on es realitza un experiment que consta de la construcció i llançament d'un model de coet a propulsió d'aigua i aire a pressió, amb una conseqüent investigació i comparació amb els coneixements i informació donats en la primera part.

Cal remarcar que aquest treball ha estat fet en base a una qüestió principal: **“Quins factors determinen el vol ideal d'un coet?”**, de la qual en formulem la hipòtesi: la resposta és que, en base a tota la part teòrica explicada al principi d'aquest treball, el vol ideal d'un coet, sigui quin sigui l'objectiu, està determinat per l'estabilitat del propi coet, on hi actuen els següents factors clau:

- 1- La ubicació del Centre de Gravetat ha d'estar més avançat que la ubicació del Centre de Pressions, es a dir, el Centre de Gravetat ha de situar-se en el con del coet, mentre que el Centre de Pressions ha d'estar a la cua.
- 2- El Marge d'Estabilitat ha de ser el més ampli possible.
- 3- El vent lateral junt amb les condicions atmosfèriques del dia de llançament han de ser les més suaus possibles.
- 4- El coet ha de tenir un disseny mínimament apropiat, amb les parts essencials com ara el con, el cos i les aletes.

Tots aquests factors garanteixen un vol ideal o perfecte d'un model de coet.

Pel que fa a l'organització, tal i com es veu a l'índex, el treball, a part d'estar organitzat en dues grans parts, segueix una pauta deductiva, ja que parteix explicant termes bastant generals (tot i que no prescindibles) i mica en mica es va centrant en la hipòtesi del treball i tota la part experimental.

A part del cos del treball, el qual és la part majoritària, també hi ha un *abstract* escrit en anglès i una introducció prèvia al cos, on el lector pot veure un breu recull del que serà el treball que ve a continuació. Paral·lelament, després del cos del treball també hi ha unes conclusions, les quals conformaran un recull dels resultats finals del treball i una opinió personal, una bibliografia, la qual serà tota la llista de llocs reals o virtuals on s'ha extret la informació utilitzada, i uns annexos on hi haurà tota la part del treball que per grandària o per format no s'han pogut afegir dintre del cos del treball.

3. COS DEL TREBALL

3.1 CONCEPTES INTRODUCTORIS

Aquest apartat del treball servirà per donar a conèixer temes i conceptes relacionats amb l'objectiu del treball, els coets espacials, per tal que posteriorment ja siguin coneguts quan se'ls mencioni i no calgui explicació alguna.

3.1.1 Enginyeria aeroespacial

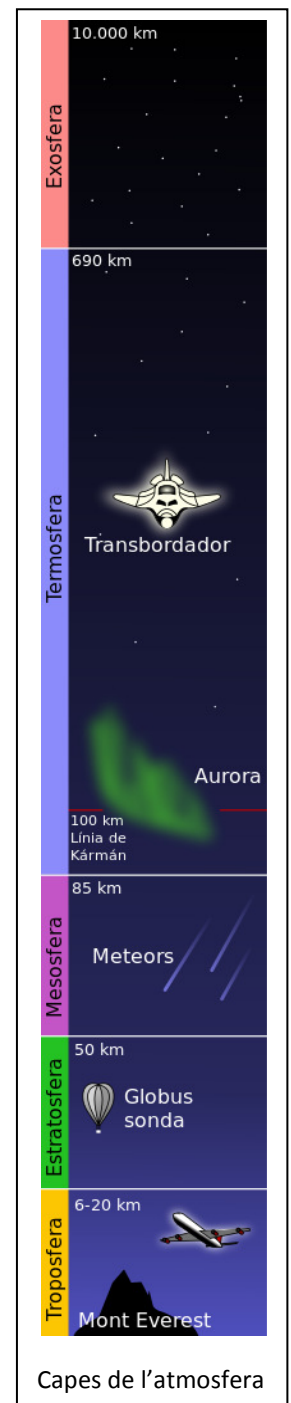
Els termes “aeroespacial”, “astronàutica” i “aeronàutica” han estat històricament confosos i de vegades mal diferenciats. Mentre que «enginyeria aeronàutica» va ser el terme original per referir-se als objectes fabricats per maniobrar en l'espai mitjançant el vol, un terme més ampli, «aeroespacial», el va superar en l'ús quan la tecnologia de vol avançava per incloure operacions de vehicles a l'espai exterior.

L'enginyeria aeroespacial és l'enginyeria que es troba darrere el disseny, construcció i ciència d'aeronaus i naus espacials. Es divideix en dues branques principals superposades: l'enginyeria aeronàutica i l'enginyeria astronàutica. La primera tracta de l'enginyeria que crea i construeix vehicles que naveguen o actuen dins de l'atmosfera de la Terra, i la segona de crear i construir vehicles que operen fora de l'atmosfera terrestre. L'enginyeria aeroespacial, especialment la branca d'astronàutica, es coneix col·loquialment en anglès com *rocket science* («ciència de coets»).

Parlant amb propietat, no existeix res que es pugui definir com el final de l'atmosfera. Una atmosfera tècnicament no acaba a cap alçada en concret, però progressivament es va fent més tènue a mesura que s'incrementa l'alçada respecte la superfície del planeta.

Durant els anys 50, mentre estudiava l'aeronàutica i l'astronàutica, un científic hongarès anomenat Theodore von Kármán va descobrir que qualsevol vehicle que intentés volar per sobre d'una altitud aproximada d'uns 100 km, per obtenir la sustentació aerodinàmica necessària per mantenir el vol, a causa de la poca densitat de l'atmosfera a aquesta alçada, havia de volar més ràpid que la velocitat necessària per entrar en òrbita. Un comitè internacional va recomanar a la Federació Aeronàutica Internacional (FAI) la línia de 100 km i, després de la seva adopció, va ser internacionalment reconeguda com la frontera de l'espai exterior.

La FAI no emprava paraules com "frontera de l'espai" o "inici de l'espai exterior", la línia de Kármán és emprada simplement per definir una alçada a partir de la qual definir si les activitats d'un vehicle formen part



de l'astronàutica o de l'aeronàutica. Així ho reflecteix la FAI en les següents definicions extretes de la seva web:

Aeronàutica -- Per als propòsits de la FAI, activitat aèria, incloent tots els esports aeris, realitzada per sota dels 100 km d'alçada de la superfície terrestre.

Astronàutica -- Per als propòsits de la FAI, qualsevol activitat realitzada a més de 100 km sobre la superfície de la Terra.

Així doncs aquesta línia, més que definir els límits de l'atmosfera terrestre, serveix per separar les activitats aeronàutiques de les astronàutiques. Col·lateralment, també serveix per definir qui és un pilot i qui és un astronauta/cosmonauta.

Tot i aquestes distincions, que serveixen per diferenciar objectes com un avió comercial, el qual diem que pertany a la branca d'enginyeria aeronàutica, i un satèl·lit comú, el qual pertany a l'enginyeria astronàutica, hi ha naus, com ara els coets espacials, el nostre objecte d'estudi, els quals operen quasi sempre per sota i per sobre la línia de Kármán, així que a partir d'ara en endavant, els coets espacials estaran compresos dins la branca de l'enginyeria aeroespacial, la branca més general.

3.1.2 Carrera espacial històrica

La invenció del coet es creu que va ser a la Xina cap al 1150, i va ser utilitzat en batalles a partir del 1232. Malgrat això, no va ser fins a finals del segle XIX i començaments del segle XX quan els científics van començar a interessar-se en els coets no com a arma, sinó com a objecte per propulsar vehicles d'estudi i/o investigació científica.

Cal destacar noms com Pere Paulet, Robert Hutchings Goddard, Theodore von Kármán i els seus alumnes, Serguei Koroliov i Wernher von Braun, sent aquests dos últims els capdavanters de la famosa competència entre la Unió Soviètica i els Estats Units, respectivament. Una recopilació cronològica dels fets més destacats de la carrera espacial, ja que és un tema molt extens que podria fer-se un altre treball a part, és:

1895 - El científic peruà Pere Paulet (1874-1945) dissenya el primer motor a propulsió amb combustible líquid, aconseguint un centenar de quilograms de força.

1903 - El científic rus Konstantín E. Tsiolkovski (1857-1935) redacta una sèrie d'articles en els quals proposa l'ús de coets per assolir l'espai exterior i la colonització de Sistema Solar. Els dos punts centrals de la seva proposta són el combustible líquid i la propulsió per etapes.

1926 - L'enginyer nord-americà Robert Hutchings Goddard (1882-1945) llança el primer coet de combustible líquid.

1942 - Els enginyers alemanys Wernher von Braun i Walter Dornberger disparen el primer V2 a Peenemünde (al nord d'Alemanya). És considerat el primer míssil i es va utilitzar en setembre de 1944 per bombardejar Londres des d'Alemanya. En el futur passaria a tenir un objectiu més científic com estudi de radiació còsmica i vols suborbitals.

1952 - Wernher von Braun estudia els detalls tècnics per a l'exploració de Mart en el projecte Mart.

1953 - Colliers Magazine publica una sèrie d'articles sobre el futur de l'home en l'espai, amb gran ressò popular a tot el món. Inclouen nombrosos articles de Von Braun, il·lustrats per Chesley Bonestell.

1957 - La Unió Soviètica llança el Spútnik I, el primer satèl·lit artificial. Aquest significatiu llançament va significar el tret de sortida de la carrera espacial competitiva entre la Unió Soviètica i els Estats Units, ja que aquests últims van veure aquest llançament com una mostra de capacitat armamentística potent. Tenia dos transmissors de ràdio (20 i 40 MHz), que van emetre «xiulets» que es podrien escoltar per les ràdios de tot el món. L'anàlisi dels senyals de ràdio es va utilitzar per recopilar informació sobre la densitat d'electrons de la ionosfera, mentre que les dades de la temperatura i pressió es van codificar en la durada dels senyals de ràdio. L'Spútnik I va ser llançat per un coet R-7. Es va cremar en la reentrada, el 3 de gener de 1958. Es va llançar també el Sputnik II, amb una gossa recollida dels carrers de Moscú anomenada Laika, la qual es va convertir en un dels primers éssers vius en orbitar la Terra (s'havien enviat mosques de les fruites anteriorment). Malauradament, també fou el primer animal en morir en òrbita.



El satèl·lit Spútnik I

1957 - Llançament del primer ICBM (sigles en anglès de Míssil Balístic Intercontinental), el soviètic R-7, conegut a l'OTAN com el SS-6 Albura. Era una imitació del coet Sputnik, variada i adaptada a objectius militars. Amb això es demostra el interès secret, la carrera espacial era també una curs per demostrar i millorar armament amb una excusa científica, encara que finalment es van fer molts avenços tecnològics i científics sense confrontacions.

1958 – Després d'un intent acabat en fracàs, anomenat “kaputnik” per la premsa, els Estats Units llancen l'Explorer 1, en un coet Jupiter-C. Aquest satèl·lit va ser construït per un grup de científics dirigits per James van Allen. A diferència del Sputnik, aquest satèl·lit va fer una troballa important, va descobrir els cinturons de radiació que envolten la Terra, els cinturons de van Allen, en honor al creador del satèl·lit.

1958 - Estats Units firma la creació de la NASA, la *National Aeronautics and Space Administration*, una entitat finançada per l'estat amb l'objectiu de progressar en la indústria i carrera aeroespacial.

1960 – La Catàstrofe de Nedelin va ser una explosió accidentada d'un coet ICBM R-16, a causa d'una errada en els motors de la segona etapa per falta de proves de seguretat, amb el resultat de la mort de quasi 80 persones, entre enginyers i operadors, menys el comandant de proves, que estava fumant lluny de la plataforma de llançament. Immediatament la URSS va posar l'accident en secret màxim ja que podia afectar a la seva reputació en plena carrera espacial. No seria fins 30 anys després quan reconeixeria oficialment el desastre.

1961 - L'URSS llancen el Vostok 1, coet i mòdul amb el qual Iuri Gagarin arriba als 327 km d'altitud, sent el primer humà a orbitar la Terra.

1961- Estats Units utilitza una càpsula Mercury amb Alan Shepard, en un vol suborbital*. El primer nord-americà en viatjar a l'espai.

1962 - Estats Units llança el MA-6 (Friendship 7) en un coet Atlas D (coet creat principalment per ser un ICBM), John Glenn és posat en òrbita. El primer nord-americà en orbitar la terra pròpiament dita.

1963 - L'URSS llança el Vostok 6, i Valentina Tereixkova la primera dona (i el primer civil) a orbitar la Terra. Va estar gairebé tres dies i va donar 48 voltes al planeta.

1965 – Creació del programa nord-americà Gemini, continuació del programa Mercury que havia aconseguit posar els primers nord-americans a l'espai, i predecessor clau del famós programa Apol·lo que aconseguiria posar a l'home sobre la Lluna.

1966 - La nau soviètica no tripulada Lluna 9 realitza el primer allunatge suau.

1969 - La nau nord-americana Apol·lo 11 impulsada per un coet Saturn V, posa el primer humà, Neil Amstrong, a la Lluna, en el marc del programa Apol·lo. El programa Apol·lo va constar de 6 primers vols no tripulats en el qual l'Apol·lo 1 va sofrir un accident d'un incendi amb 3 morts; 5 vols tripulats de prova, on es va entrar en òrbita lunar, i 6 últims vols en els quals es va aconseguir l'allunatge. Aquesta fita va posar fi a una carrera espacial exageradament costosa econòmicament i competitiva. Tot i així la URSS i els Estats Units van seguir investigant i desenvolupant nous objectius.

1971 – La URSS posa en òrbita la Salyut-1, la primera estació espacial.

1974 – La URSS llança el seu primer satèl·lit geostacionari de telecomunicacions.

1975 – Neix a París l'Agència Espacial Europea (ESA)

1981 - La llançadora espacial nord-americana Columbia és el primer vehicle espacial reutilitzable, en aterrar com un avió.

1986 – El Challenger explota en plena sortida i moren els seus set tripulants.

1986 – La URSS posa en òrbita l'estació espacial MIR, que es manté en funcionament fins 2001.

1990 – El telescopi Hubble és col·locat en òrbita.

1997 – La sonda “Mars Pathfinder” de la NASA arriba a la superfície de Mart i ofereix les primeres imatges.

*El vol suborbital és un vol en el qual es supera la línia de Kármán, els 100 km d'altitud, però no es realitza una òrbita a la Terra, sinó que seria més semblant a un moviment parabòlic. Ha estat utilitzat en experiments i fins i tot en vols turístics.

1998 - El nord-americà Deep Space 1 realitza la primera missió espacial utilitzant un motor a base de reacció d'ions per a la seva propulsió. En aquest mateix any es col·locada en òrbita l'Estació Espacial Internacional (ISS).

A partir d'aquí més països com Xina, Índia, Japó i corporacions privades com SpaceX s'incorporen en la investigació espacial.

2000 – Sergei Krikaliiov, Yuri Guidzenko i William Shepard són els primers astronautes en habitar l'Estació Espacial Internacional.

2001 – Dennis Tito es converteix en el primer turista espacial.

2003 – Es desintegra en ple vol el transbordador espacial Columbia, on hi moren els set tripulants que hi havia a bord. El fatal accident va tenir lloc en el moment de la reentrada del transbordador, quan ja havien finalitzat la seva missió. El desastre s'arrossegava des del moment de llançament del transbordador, el qual va patir un impacte d'un tros d'espuma de poliuretà del coet llançador d'un quilo que va impactar a una velocitat de 805 km/h aproximadament, però com els astronautes no van notar res, control de missió va desestimar l'abast del defecte, que causaria la desintegració de la nau en el moment de reentrada.

En el mateix any es llança la Mars Express, la primera sonda de la ESA cap a Mart i la Xina llança la seva primera missió tripulada Shenzhou.

2004 – L'Opportunity de la NASA trepitja terra ferma a Mart.

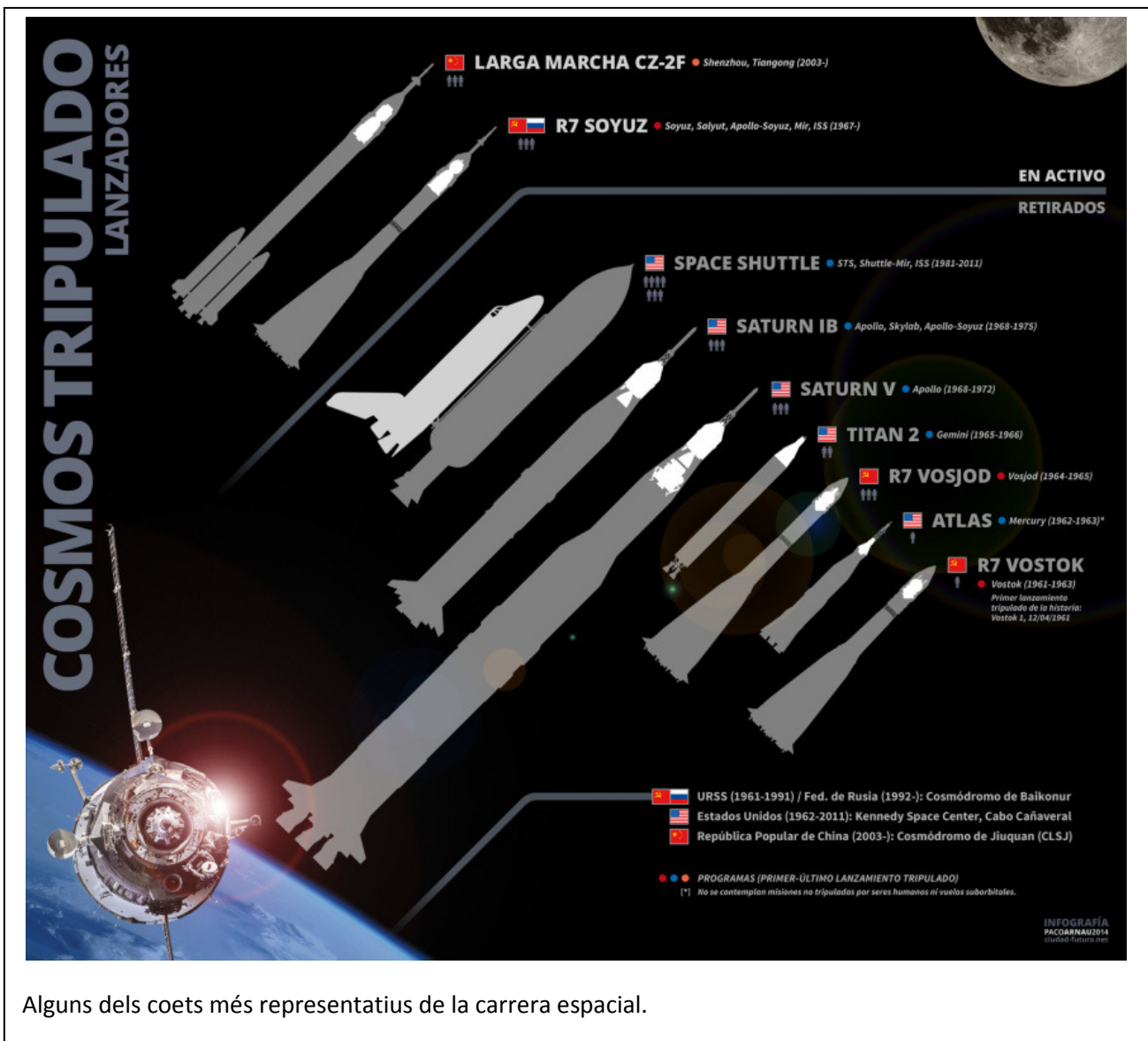
2007 – Japó llança la seva primera missió d'exploració lunar

2008 – Índia llança la seva primera missió d'exploració lunar no tripulada, Chandrayaan I

2010 – Japó llança una vela solar experimental que aconsegueix volar més enllà de Venus.

2012 – Primer coet d'una entitat privada (SpaceX) que abasteix l'Estació Espacial Internacional.

2013 – Primer astronauta androide de Japó anomenat Kirobo



3.1.3 Modelisme espacial

El modelisme espacial és una activitat lúdica i educativa en la que es construeixen i fabriquen models de coets, ja siguin de disseny propi o bé una imitació a escala d'un coet real. Aquests coets obeeixen les mateixes lleis físiques pel que fa a coets reals, ja sigui vol parabòlic o orbital. Poden ser coets recuperables i utilitzables, i han de ser construïts amb materials lleugers. El modelisme espacial també es practica com a competició esportiva, catalogat dintre d'esport-ciència, i es regeix per la normativa FAI (Federació Aeronàutica Internacional), on hi té una categoria pròpia, i en la qual el modelista espacial pot competir en diferents modalitats.

En l'àmbit educatiu, aquesta activitat científica i tècnica és bastant completa ja que abasta diferents àmbits d'estudi científic que intervenen en la investigació aeroespacial com la física, la química, l'aerodinàmica, les matemàtiques, l'electrònica, la informàtica, el disseny assistit

per ordinador etc. En països com els Estats Units i el Japó (aquest últim és d'on prové el dossier utilitzat per a la construcció del coet), el modelisme espacial s'imparteix en moltes escoles i instituts com a assignatura alternativa per fomentar el interès dels estudiants per aquests àmbits científics mitjançant un treball pràctic com ho és el modelisme espacial.

El Modelisme Espacial és considerat també, en l'aspecte lúdic, com un 'hobby' entre els que el practiquen de forma amateur per tot el món. Molts d'aquests aficionats provenien del camp de l'aeromodelisme. La seva pràctica es regeix pel Codi de Seguretat NAR de rigorós compliment per tots els Clubs i Associacions de modelistes espacials de tot el món.

El Modelisme Espacial és una activitat separada però complementària a la de la "Coeteria Experimental", la qual és molt més extensa i complexa. En la Coeteria Experimental el modelista, a més de dissenyar i construir els seus propis models de coet, també construeix els seus propis motors de forma artesanal.

Hi ha més d'una institució que des de ja fa un temps organitza competicions de modelisme espacial, una d'elles és la RFAE (Real Federació Aeronàutica Espanyola), la qual organitza anualment competicions de Modelisme Espacial en diferents modalitats i sota la Normativa FAI. La Reial Federació Aeronàutica Espanyola està integrada a la FAI, i la seva presència a Espanya està representada per les diferents federacions autonòmiques d'esports aeris. En les federacions autonòmiques s'integren els Clubs i Associacions, i en ells s'integren els esportistes que practiquen el modelisme espacial i participen en les competicions autonòmiques, nacionals i internacionals.

Les competicions autonòmiques són aquelles que són organitzades pels Clubs en l'àmbit autonòmic, i en elles es realitza una primera classificació d'acord amb la puntuació aconseguida.

Les competicions nacionals són organitzades pels Clubs en nom de la RFAE, i dels resultats de les mateixes es realitza una classificació a nivell nacional, on són seleccionats els esportistes que participaran en les següents competicions internacionals.

Les competicions internacionals es celebren als diferents països integrats a la Federació Aeronàutica Internacional, i són organitzades pels Clubs en nom de la FAI amb prèvia autorització d'aquest organisme.

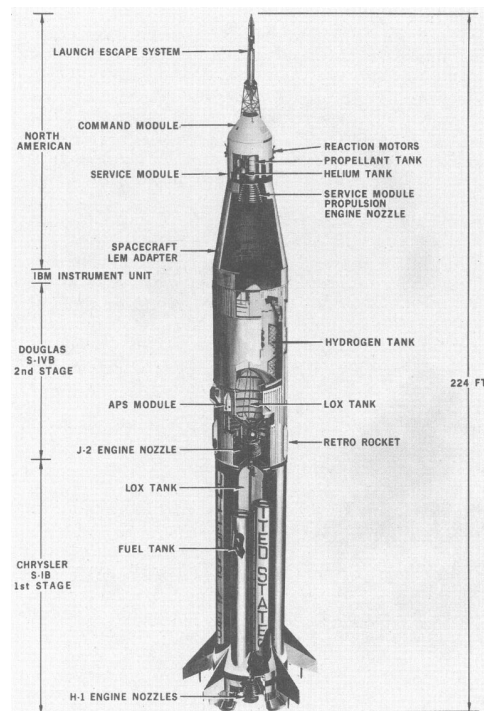
Les modalitats per a competició FAI en modelisme espacial són:

- S1A Altura
- S3A Duració paracaigudes
- S4A Duració planatge
- S6A Duració banderola
- S7 Models a escala
- S9 Duració girocòpters

3.1.4 Parts bàsiques d'un coet

- La ogiva: És la part del coet que "obre camí" durant el vol, per tant és la part que genera el major arrossegament aerodinàmic. Existeixen nombroses formes d'ogiva, però totes tenen una funció important en l'aerodinàmica del coet.
- El cos: Aquesta part del model sol consistir en un tub allargat i prim. Constitueix principalment el fuselatge del coet sobre el qual van adossades les aletes estabilitzadores i un petit tub pel qual llisca el model al llarg d'una vareta, o més d'una, com en el nostre cas. Aquesta vareta s'anomena "Guia de llançament", i s'utilitza perquè el coet adquireixi una adreça inicial en el moment d'enlairar-se. Al seu interior conté el dispositiu de recuperació i el motor.
- Les aletes: Les formes de les aletes poden ésser molt variades, però en definitiva són superfícies planes que serveixen per estabilitzar el model durant el vol, ja que, al estar a la part final, fan baixar el Centre de Pressions respecte el Centre de Gravetat, com bé explicarem més endavant. A diferència de les ales d'un avió, les aletes d'un model de coet són més petites i les superfícies són iguals per les dues cares.
- El motor: És l'encarregat de proporcionar l'impuls necessari per moure el coet. El motor va allotjat en un tub porta motor, i es manté subjecte mitjançant una forquilla que impedeix que aquest es desplaci per dins del cos.

Pel que fa a aquest treball, com ja veurem més endavant, la part pràctica s'ha realitzat amb un coet d'aigua, el qual es diferent d'un coet a base de combustible ignífug i motor mecànic, però hi actuen els mateixos principis i té les mateixes parts bàsiques, que són: la ogiva, el cos i les aletes. Ho veurem millor en l'apartat de construcció del coet més endavant. Aquí una comparació de l'esquema d'un model de coet típic amb l'esquema del coet Saturn IB:



3.2 CONCEPTES FÍSICS

En aquest apartat mencionaré i explicaré breument alguns dels conceptes o lleis físiques que intervenen en el llançament i vol d'un coet espacial, ja sigui un model o un real.

3.2.1 La Gravetat

Per explicar breument la gravetat, he de introduir també el concepte de camp: un camp és una regió de l'espai en la qual hi ha present una magnitud física en tots els punts d'aquesta regió, i, segons el tipus de magnitud (escalar o vectorial), tindrem un camp escalar o un camp vectorial respectivament. Són exemples de camps escalars la variació de temperatura, densitat i pressió a l'atmosfera depenent de l'altura i són exemples de camp vectorial les velocitats, acceleracions i forces.

El camp de forces és aquell en el qual, en posar-hi una partícula, aquesta experimenta una força. Un exemple n'és el camp gravitatori: dos cossos de massa m_1 i m_2 a una distància tenen un camp gravitatori cadascun. m_1 atrau m_2 a través d'una força gravitatòria causada pel camp d' m_1 , i a la inversa; es a dir, s'atrauen entre si.

El camp gravitatori té una particularitat: les forces que actuen sobre la massa, independentment de la posició van dirigides cap a un mateix punt: el centre de forces. Aquestes forces són les forces centrals.

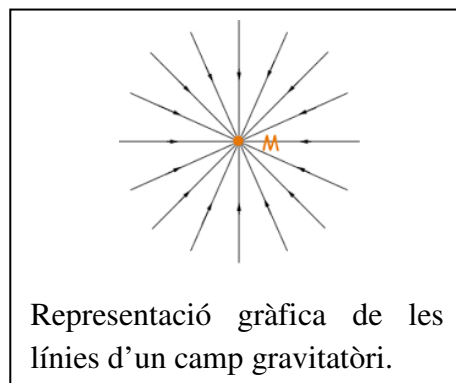
Són forces newtonianes aquelles que verifiquen que $F = \frac{k}{r^2}$, on F és la força newtoniana, r la distància al centre de forces i k una constant. Això vol dir que aquest tipus de força té una relació de proporcionalitat inversa al quadrat de la distància que la separa del centre de forces.

La intensitat d'un camp físic es defineix com la relació entre la força que actua sobre una partícula i el valor de la magnitud física de la partícula que fa que aquesta sigui sensible a la força. En el camp gravitatori la intensitat de camp és igual a $\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$. m és la massa de la partícula, la magnitud física associada al camp gravitatori.

Un camp vectorial es pot representar gràficament amb línies de camp on la direcció d'un punt es determina amb la tangent a la línia de camp per aquest punt i on el mòdul es determina per la densitat de línies de camp que passen per aquest punt.

La lei de la gravitació universal diu que la força d'atracció entre dues masses m_1 i m_2 separades a una distància r és directament proporcional al producte de les masses, i inversament proporcional al quadrat de la distància que les separa. Matemàticament:

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{u}$$



G és la constant de la gravitació universal ($6,67 \cdot 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$).

Si substituïm l'equació de la força gravitatòria en l'equació d'intensitat de camp gravitatori ens queda que la intensitat de camp gravitatori és inversament proporcional al quadrat de la distància:

$$\vec{g} = -G \frac{m}{r^2} \vec{u}$$

Mitjançant la segona llei de Newton podem comprovar que la intensitat d'un camp gravitatori, abans mencionada, correspon a una acceleració:

$$\sum \vec{F} = ma \rightarrow m \vec{g} = m \vec{a} \rightarrow \vec{g} = \vec{a}$$

És cert que Einstein, amb el seu model de la relativitat general, va acabar de polir el model de Newton, però no l'explicarem aquí per la seva dificultat i perquè els resultats, quan parlem de coets i condicions "normals" són quasi bé els mateixos.

Tornant a les equacions de Newton, podem deduir quina és la velocitat d'escapament mínima que necessita un cos per sortir o escapar de l'atracció gravitatòria que genera un altre cos, normalment un cos celeste com un planeta, estrella o satèl·lit.

Per calcular la velocitat d'escapament d'un objecte qualsevol de massa m es considera que l'energia cinètica d'aquest cos ha d'igualar l'energia potencial gravitatòria que el lliga al cos celeste, de massa M. Qualsevol energia cinètica igual o superior a aquesta permetrà escapar de l'atracció gravitatòria:

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = \frac{GMm}{r}$$

aïllant d'aquí la v_0 :

$$v_0 = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

on

$$v_0 = v_e$$

v_e és la velocitat d'escapament.

G és la constant de la gravitació universal ($6,672 \cdot 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$).

M és la massa del cos celeste (planeta, satèl·lit natural o estrella).

r és la distància entre el centre del cos i el punt per al qual estem calculant v_e (si som a la superfície del cos, r serà igual al seu radi).

Cal destacar -com ja s'ha dit- que el valor de la velocitat d'escapament no depèn de la massa m de l'objecte; només depèn de la massa del cos celeste: augmenta amb la massa d'aquest i disminueix a mesura que ens allunyem del seu centre.

Veiem que si fem els càlculs amb el planeta Terra (el qual té un radi de 6371 km i una massa de $5,9736 \times 10^{24}$ kg):

$$v_e = \sqrt{\frac{2(6,672 \cdot 10^{-11})(5,9736 \cdot 10^{24})}{6371 \cdot 10^3}} = 11185,54 \frac{m}{s} = 40267,97 \frac{km}{h}$$

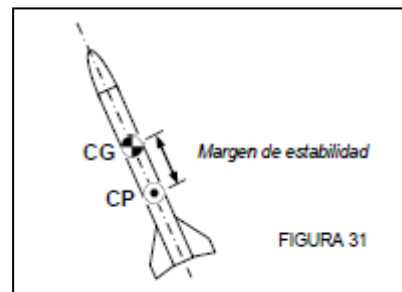
Així comprovem que si un coet vol sortir o escapar de l'atracció gravitatòria de la Terra, haurà d'anar com a mínim a 11185 m/s.

3.2.2 Conceptes bàsics en el vol d'un coet

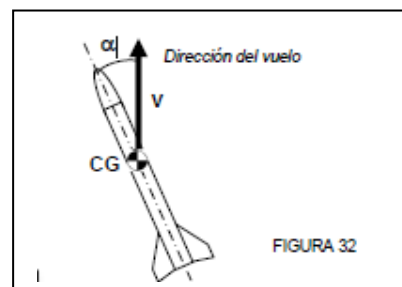
-El **Centre de Pressions o CP** és el punt on es concentren totes les forces aerodinàmiques normals que actuen durant el vol d'un model de coet, es a dir, el punt on actua la força normal resultant de totes les forces de pressió que exerceix l'aire sobre la superfície del model. La ubicació exacta del punt pot variar depenent d'uns factors que veurem més endavant.

-El **Centre de Gravetat o CG** és el lloc on es concentra tot el pes del coet, es a dir, hi ha tant pes distribuït davant del CG com darrere d'aquest. La ubicació d'aquest punt varia durant el vol del coet, ja que el combustible és, normalment, la major part del pes d'un coet. Altres noms per al CG són: Centre de Masses, Punt de Balanceig o Punt de Gir, ja que un cos girarà sempre al voltant del seu CG.

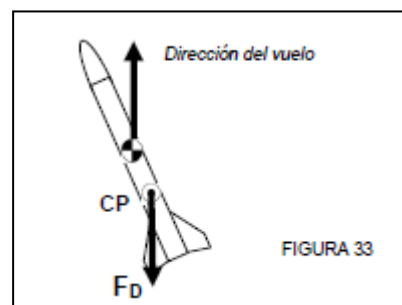
-El **Marge d'Estabilitat** en un coet es la distància que hi ha entre el CP i el CG. Aquesta distància també es coneguda com Braç de Palanca. Per conveni, la distància mínima per considerar-la com Marge d'Estabilitat es una separació entre el CP i CG igual al major diàmetre del cos del coet. A aquesta distància se la coneix com calibre. (FIG. 31)



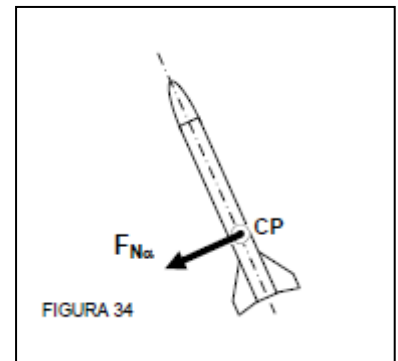
-L'**Angle d'Atac** o AOA és l'angle que forma l'eix longitudinal del coet respecte a la direcció que aquest porta durant el vol. Es representa normalment amb la lletra grega Alfa. (FIG. 32)



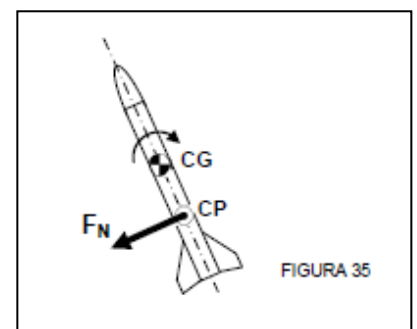
-La **força d'arrossegament (FD)** és la força aerodinàmica que actua directament sobre el CP i en sentit contrari a la direcció de vol quan el coet es mou a través de l'aire que el rodeja. La intensitat d'aquesta força dependrà de la superfície de secció transversal del coet que estigui de front a l'aire. La força d'arrossegament actua com un fre sobre el desplaçament del coet en vol lliure. (FIG. 33)



-La **Força de Sustentació o Normal (FN)** és la força que actua directament sobre el centre de pressions de forma perpendicular a l'eix longitudinal del coet, es la resultant de totes les forces aerodinàmiques que actuen sobre el coet i es la responsable de que el coet pivoti o giri al voltant del seu CG, provocant així un moment de gir. La Força Normal sempre intenta o tendeix a reduir l'angle d'atac. (FIG. 34)



-El **moment de gir** és la tendència que fa girar el coet al voltant del seu CG. En un model de coet el moment de gir es calcula multiplicant la Força Normal per la distància entre el CP i CG, es a dir, el marge d'estabilitat. (FIG. 35)



-El **moment lineal** o quantitat de moviment en un instant determinat és una magnitud vectorial que es defineix com el producte de la massa d'un cos per la velocitat que porta en aquell instant:

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

En un vol d'un coet el qual negligim la força de la gravetat, el fregament amb l'aire i la viscositat del combustible, tindriem una conservació del moment lineal, és a dir:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = 0$$

-La **força** d'un cos determinat és una magnitud vectorial que equival al producte de la massa d'un cos per la seva acceleració:

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

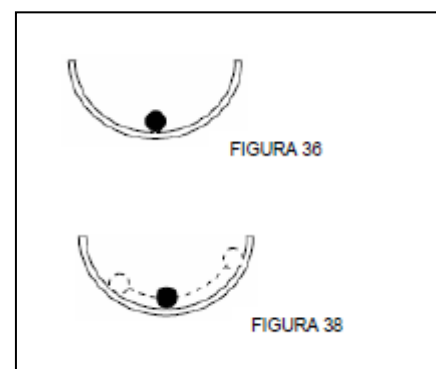
-El **impuls** és la quantitat de força aplicada en un interval de temps o bé la variació del moment lineal en el mateix interval de temps:

$$I = \vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \vec{a} \cdot \Delta t = m \cdot \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v} = \Delta \vec{p}$$

3.2.3 El vol i la estabilitat

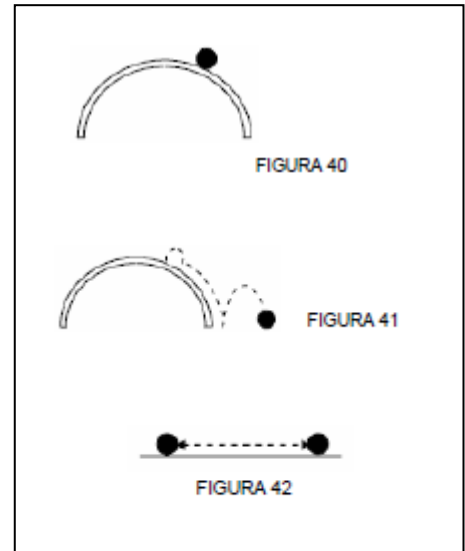
Una bona estabilitat en el vol d'un coet és sempre essencial i imprescindible, ja que aquesta garanteix la seguretat dels passatgers i el triomf de la missió, i és per això que un modelista de coets haurà de procurar la millor estabilitat possible per al seu model.

Diem que un objecte és **estable** quan, al aplicar-li una força externa, aquest torna a la seva posició inicial. Per

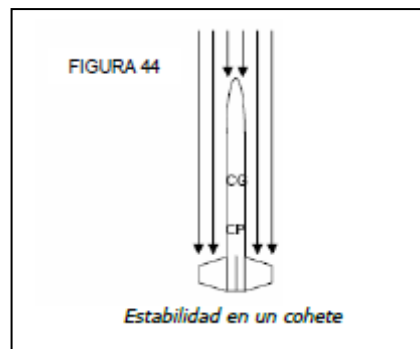


exemple, si posem una bola dintre d'un vol i li apliquem una força externa, aquesta oscil·larà fins a tornar a la seva posició de repòs o inicial. (FIG. 36/38) En canvi si girem el vol al revés i posem la bola a dalt, aquesta caurà a la mínima força que se li apliqui. En aquest últim cas diem que la bola és **inestable**, ja que al aplicar-li una força externa oscil·la sense trobar la posició inicial. (FIG. 40/41)

Hi ha un tercer cas: si deixem la bola en un pla horitzontal i li apliquem una força, aquesta oscil·larà fins a trobar una nova posició neutra semblant a la inicial. En aquest cas diem que la bola té una **estabilitat neutra**, encara que a la pràctica és molt difícil que un coet tingui aquest tipus d'estabilitat. (FIG.42)

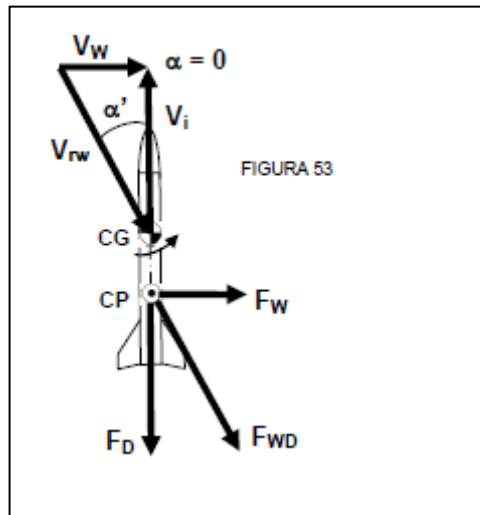


La estabilitat en un coet dependrà principalment del marge d'estabilitat, del CG i del CP, ja que **un model de coet serà estable sempre que el seu Centre de Pressions (CP) estigui situat per sota del seu Centre de Gravetat (CG)**. Això és així ja que quan més avançat o més cap a la part del con estigui el CG, menys oscil·larà quan les forces laterals facin girar el coet, ja que la força de l'aire que frega la superfície de cara farà que la poca oscil·lació lateral que tingui el coet torni a 0 i segueixi estable. En el cas contrari, si el CG estigués situat a sota del CP, amb la mínima força lateral que hi hagués el coet es donaria la volta ja que l'aire que ve de cara el faria girar. (FIG. 44)

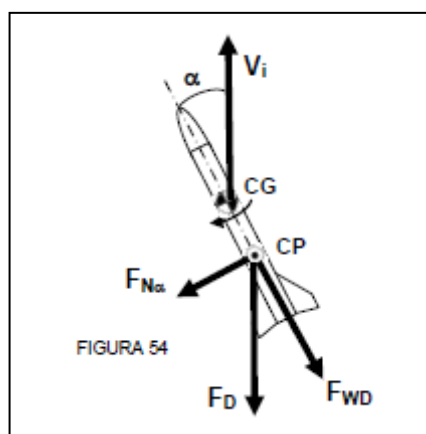


Aquesta afirmació serà demostrada per l'experiment que s'explica més endavant, però ara anem a explicar-la teòricament.

Tot i que el marge d'estabilitat juga un paper molt important en la estabilitat del vol, no són els únics punts a tenir en compte. El moment més crític en el vol d'un model de coet és el moment del llançament, ja que el coet no ha agafat encara prou velocitat i és quan el vent lateral pot desestabilitzar més el coet, és per això que s'utilitza sempre uns rails de guia per guiar el coet en els primes instants i dirigir-lo. Aquí s'aprecia en un diagrama de forces (FIG. 53):



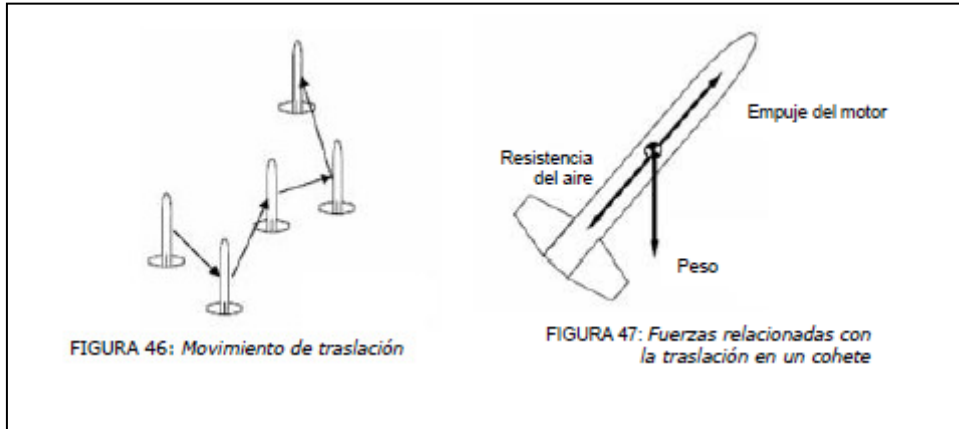
Aquest diagrama està fet just en el instant de llançament, quan el coet encara no ha sortit de la llançadora però ja ha adquirit una certa velocitat V_i . També veiem la velocitat del vent V_w i la resultant d'aquestes últimes, anomenat vent relatiu V_{rw} . El vent i el vent relatiu també tenen les respectives forces representades en el CP. F_D és la força d'arrossegament definida anteriorment, causada pel fregament amb l'aire, i per últim tenim un angle d'atac α' que representa l'angle potencial que encara no s'ha produït però es produirà quan el coet surti dels rails de guia. Aquí el diagrama de forces quan el coet surt de la llançadora (FIG. 54):



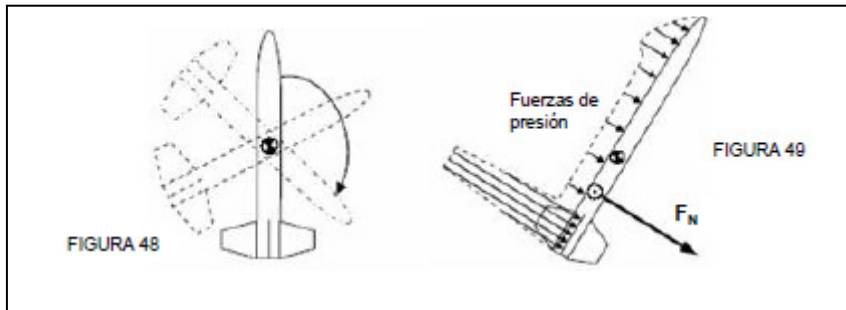
És aquí on l'angle d'atac potencial α' esdevé real i on la força d'arrossegament F_D es descompon en F_{WD} la qual actuarà frenant el coet, i la $F_{N\alpha}$, la qual provoca un moment de gir que redirigirà verticalment la direcció i per tant l'angle d'atac, demostrant un cop més que l'estabilitat depèn de la situació de CP i CG.

Un cop definida l'estabilitat, passem a veure el vol. Un coet té tres tipus de moviments durant el seu vol:

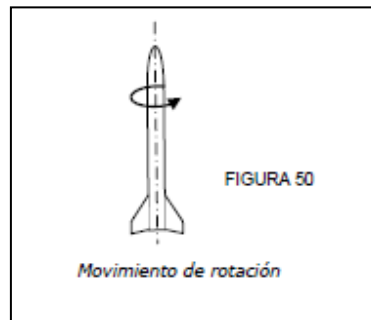
- Moviment de translació: és un moviment en el qual el coet es desplaça cap a un costat o un altre però sempre apuntant cap a la mateixa direcció (FIG. 46) Aquest moviment està relacionat amb la altitud màxima que assolirà el coet, i les causes del moviment són: el pes, el impuls del motor i la resistència de l'aire. (FIG. 47)



- Moviment de gir: és aquell moviment en el qual el coet gira al voltant d'un eix de rotació que passarà sempre pel CG (FIG. 48). Aquest moviment determinarà en gran quantitat la estabilitat del vol, i la causa del moviment és principalment la pressió de l'aire o el vent que actua perpendicularment al CP. (FIG. 49)



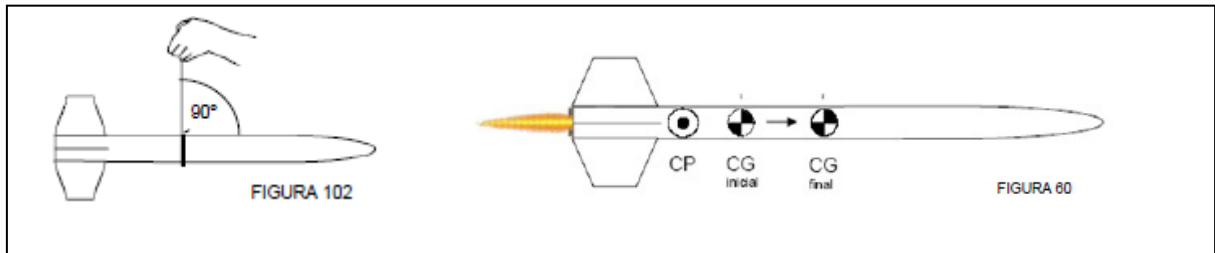
- Moviment de rotació: és aquest moviment on el coet gira al voltant del seu eix longitudinal, el qual també passa pel CG. (FIG. 50) Aquest moviment és causat per les forces aerodinàmiques que actuen sobre les aletes, les quals han d'estar ben orientades respecte el eix longitudinal, ja que sinó el coet giraria com una baldufa. (FIG. 50)



Tots aquests tres tipus de moviments es combinen i formen la trajectòria de vol del coet.

3.2.3 Ubicació del Centre de Gravetat i Centre de Pressions

Per començar, el centre de gravetat és el més fàcil de localitzar. Per fer-ho només hem de saber que, en absència de forces considerables excepte el propi pes, el coet romandrà estàtic si se'l sosté només per un eix on hi hagi el CG. Per tant, envoltant el coet amb un fil i desplaçant-lo trobarem al CG allà on el coet no oscil·li. (FIG. 102). Tot i la facilitat d'ubicar el CG, hem de tenir en compte que aquest es desplaçarà durant el vol, ja que el pes del coet és, en gran part, el combustible, el qual es perd durant el trajecte.(FIG. 60)



Al contrari que la ubicació del CG, el CP és més complex de situar, depenent el mètode que s'utilitzi. Aquí s'explicarà cadascun dels mètodes de més senzill a més complicat.

La forma més senzilla però menys precisa amb la qual podem calcular la ubicació del CP es coneix com a mètode del Centre de l'Ala Lateral, i consisteix a calcar la forma del coet en cartró normal, retallar-lo i buscar el eix d'equilibri igual que en el CG. Aquest mètode és inexacte ja que tenim un error de mesura gran i el resultat no és gaire fiable, encara que ens doni una idea de la situació del CP.

El mètode que s'utilitza en general per determinar la ubicació del CP són les equacions de Barrowman, anomenades així pel seu descobridor, l'enginyer espacial James Barrowman. Aquestes equacions es compleixen sempre i quan el coet en qüestió compleixi uns requisits: Que viatgi a velocitats subsòniques, que tingui un angle d'atac pròxim a 0 i que viatgi en un medi uniforme que no canviï sobtadament.

Les diverses parts d'un coet ja tenen els seus propis CP i CG, així que, en el mètode Barrowman, es calculen els CP per separat i, un cop ja els tinguem localitzats, els combinem tots per trobar a quina distància estarà situat el CP. Quan ubiquem el CP en el nostre model ens ajudarem del mètode Barrowman.

Cal remarcar que aquests són els mètodes explicats en un dossier molt ample i complet sobre modelisme espacial que deixo adjunt a la bibliografia fet per Jesús Manuel Recuenco Andrés.

3.3 EXPERIMENT: UN COET D'AIGUA I AIRE A PRESSIÓ

Tot el que s'ha explicat fins ara pertany a la part teòrica del treball, ja que és un recull d'informació recopilada per posar en situació al lector del tema que s'està treballant. Dit això, en aquest apartat comença la part pràctica del treball, on s'anirà contrastant informació dita amb anterioritat amb tot l'experiment que s'ha dut a terme en aquest treball.

Aquest experiment s'ha dut a terme en un interval de 125 dies si es conta la data de compra dels materials com a data inicial de l'experiment (24/03/2016), i 84 dies si es conta el primer dia de construcció del coet i llançadora com a data inicial (8/05/2016). Aquesta diferència és causada pels problemes detallats més endavant en el apartat 3.3.1.2.

Exceptuant el dia de compra dels materials, tot el treball experimental s'ha realitzat a casa la meua àvia, en un poble prop de Terrassa anomenat Les Fonts, i, si filem més prim, la construcció del coet s'ha dut a terme en el pàrquing de casa de la meua àvia i els dotze llançaments s'han fet en un parc bastant extens que hi havia a la vora (però tot i així ens hi havíem de traslladar amb cotxe cada vegada per portar tots els materials), el qual es diu Parc de les Fonts. La raó de la localització és perquè a Barcelona no hi ha tant espai ni per construir-hi la plataforma de llançament a casa meua, ni per fer-hi els llançaments sense que hi hagi gent en algun parc.



3.3.1 Construcció

Per fer el treball m'he basat principalment en dos dossiers molt extensos públics a la xarxa: un Manual de l'Educador per impartir classes de com fer un model de coet d'aigua i aire a pressió, on s'explica tot el procés de muntatge del coet i la plataforma, fet per la JAXA (Organisme d'Exploració Aeroespacial de Japó) i un altre dossier anomenat *Modelismo Espacial* on s'explica tota la part de física dels llançaments dels coets i el modelisme espacial fet per Jesús Manuel Recuenco Andrés (els dos contrastats a la bibliografia). Tot i això, tota la

informació obtinguda a partir d'aquests dossiers l'anava contrastant amb altres fonts, i totes coincidien la majoria de vegades.

3.3.1.1 Construcció del coet i de la plataforma de llançament

Pel que fa al coet pròpiament dit, en el dossier de la JAXA posava que es necessitaven els següents materials:

-Dues ampolles de sifó d'1,5L. Es va escollir de sifó ja que les ampolles que contenen begudes gasoses poden aguantar una pressió més elevada (Entre 4 i 5 atm). Tècnicament, només una ha de ser gasosa ja que l'altra servirà per fer el con del coet.

-Làmina de PVC de 10cm x 20cm per a la fabricació de les aletes.

-Carpeta plàstica DIN A4 la qual s'utilitzarà per fer el faldó on hi aniran enganxades les aletes.

-Plastilina 50g que ens serveix perquè el coet tingui llast a la part capdavantera, fet que portarà com a conseqüència un desplaçament posterior del Centre de Gravetat, estabilitzant més el coet a l'hora de volar.

-Una bossa d'escombraries de 45L que suplirà el fet de no utilitzar paracaigudes, ajudant a no malmetre el coet en el seu descens.

-Cinta adhesiva de vinil per enganxar totes les parts del coet.

-Filtre per contenir la pressió de l'aigua i aire dintre el coet.

-Estisores i cúter per treballar apropiadament.

-Fusta per tallar per no fer malbé la taula on hi treballem.

-Marcador permanent per marcar els punts de tall.

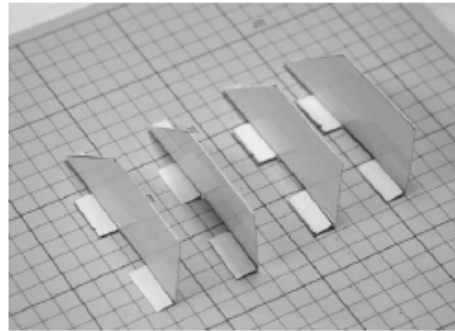
Amb tota aquesta llista el dia 24/03/2016 el meu pare i jo vam anar a Servei Estació a proveir-nos de tot el material. El preu total pels materials de construcció del coet va ser de 35 €.



Aquí es veu tot el material comprat per construir el coet.

Tot el procés de construcció es pot consultar més a fons en el dossier adjunt a la bibliografia mencionat anteriorment. Aquí n'explicaré la construcció amb fotos meves:

1. Primer es marquen les mides de les aletes en el material que utilitzarem, i les retallem amb cúter o estisores, i les dobleguem fent-hi unes petites pestanyes per enganxar-les posteriorment.



2. Posteriorment tallarem la part posterior (on bevem) d'una de les ampolles, i li retallem l'obertura per veure. El tros de plàstic que ens ha quedat l'enganxem a la part inferior de l'altra ampolla i hi introduïm la plastilina, i la bossa d'escombraries en aquest mateix ordre.



3. Quan ja tenim el cos principal del coet, agafem la carpeta plàstica per fer el faldó i realitzem 4 talls equidistants, on hi enganxarem les aletes amb cinta.



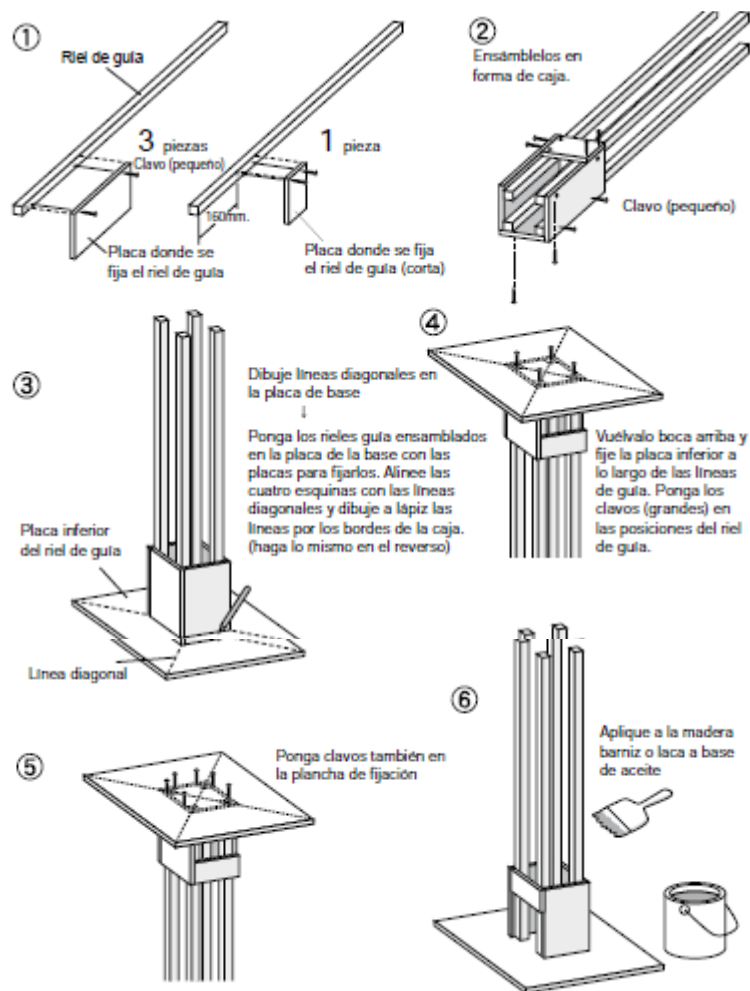
4. Ara ja tenim les dues parts principals, les enganxem on coincideixin el fi de les aletes amb el filtre, el qual va enroscat a l'ampolla principal.



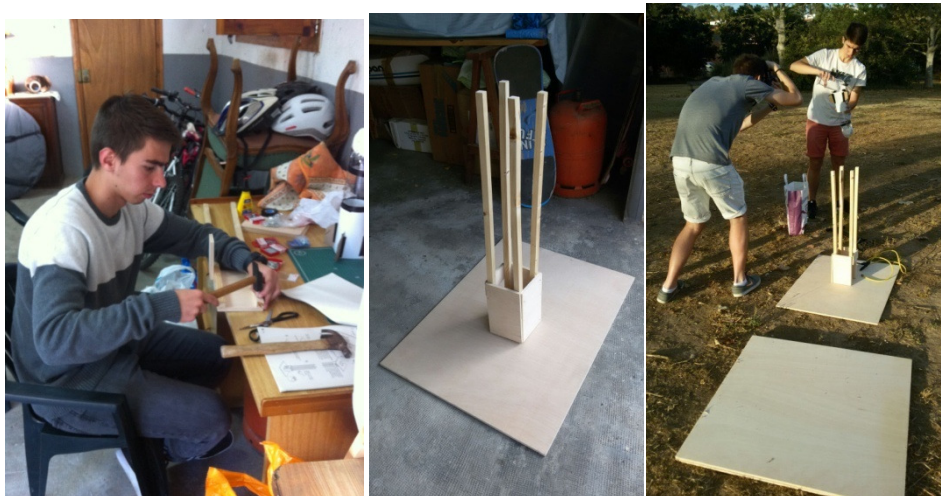
I ja tenim el nostre coet construït i llest pel llançament.



I ja tenim el coet construït. Ara passarem a explicar la llançadora. La plataforma de llançament està feta principalment de fusta. En aquests dibuixos s'explica el seu muntatge:



Les fustes per fer la plataforma van costar 92 €. Aquí algunes fotos meves muntant i amb la plataforma ja enllestida:



A part de les fotografies adjuntades en aquest apartat, hi ha dos vídeos en suport gràfic els quals es poden trobar en el apartat d'annexos, on hi surto construint la plataforma.

Tota la part de construcció del coet i de la plataforma va durar des del 8/05/2016 fins al 9/07/16, quasi exactament dos mesos. Es podria haver construït més ràpidament, però el procés es va veure afectat per què la construcció havia de fer-se el cap de setmana que anés a casa la meua àvia, es a dir, cada 15 dies mínim.

3.3.1.2 Problemes a l'hora de construir i solucions pertinents

- Un dels primers problemes que van sorgir al escollir aquesta part experimental va ser on dur-la a terme. Per una banda, el lloc de construcció havia de ser un taller apte per treballar, proveït d'eines per manipular fusta i altres materials. A la vegada, aquest lloc de construcció havia d'estar a poca distància del lloc de llançament, ja que en realitzaríem més d'un i no volíem gastar massa gasolina i esforços transportant la plataforma (8 kg), la manxa, el coet etc. Per últim, el lloc de llançament havia de ser un espai obert, on no hi hagués aflluència de gent ni gaires edificis on es podia colar el coet.

Per sort, el lloc més adequat, com he explicat en la introducció de l'apartat 3.3 era el poble on hi viu la meua àvia, on hi podia construir el coet i plataforma tranquil·lament en el seu garatge, i a la vegada era a prop d'un parc on hi anem molt amb bici poc conegut per la gent on rara vegada hi ha algú qui molestar.

- Un cop solucionat la ubicació de l'experiment em vaig enfocar en el dossier de construcció del coet. A primera vista sembla un dossier molt complet (i ho és, no hi trec mèrit) però a l'hora d'anar a comprar els materials hi van haver alguns problemes. El més evident va ser el polsador de llançament, el suposat mecanisme que faria que el filtre enroscat al coet parés de contenir la seva pressió i conseqüentment deixés sortir tota l'aigua continguda.



Com diu al dossier, el dispositiu de llançament consistia en un fre de bicicleta adjunt a un "acoblament prefabricat on es fixa el filtre". Aquesta última peça va ser impossible de trobar ja que ni els tècnics de Servei Estació, el centre comercial on hi vaig comprar el material, no sabien de la seva existència.

-Aquest últim problema ens porta directament al següent: el suposat filtre que conté tota la pressió de dintre el coet i es pot enroscar fàcilment a una ampolla convencional tampoc existeix.

• Boquilla



Això es el que explicava el dossier, però la peça de la fotografia es un filtre de mànega de reg de jardineria, el qual ni s'enrosca a una ampolla comercial ni conté pressió de ningun tipus. Van ser aquests dos últims problemes els quals van retardar l'inici de la construcció. Una possible solució que se'm va ocórrer va ser utilitzar un tap de suro el qual tingués una obertura per on ficar-hi el piu de la manxa, i quan la pressió de dins el coet superés la fricció del tap, aquest últim sortís disparat com una ampolla de xampany.



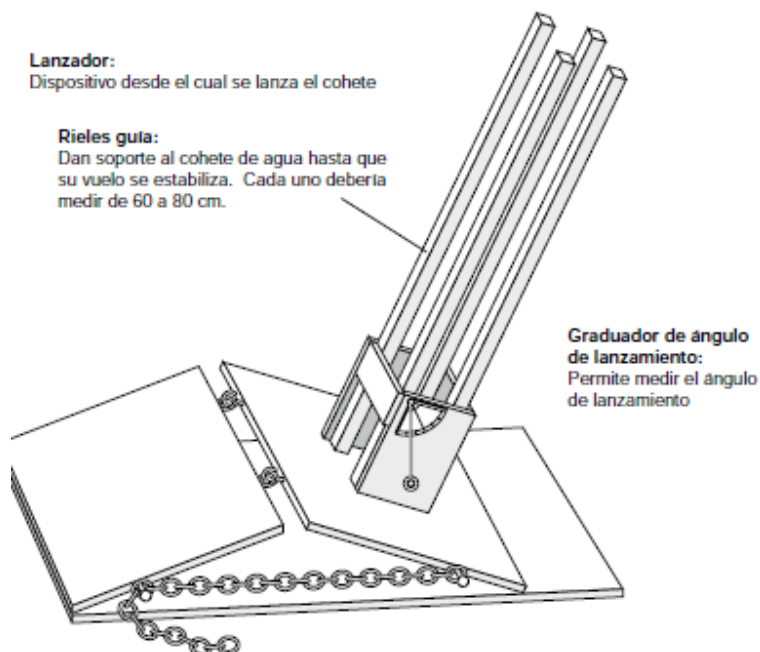
Per sort, quan ja semblava que aquesta era la solució definitiva, el meu pare em va dir que tenia un amic que va ser aficionat als coets d'aigua durant un temps, i que encara conservava algun filtre que s'enroscava bé a l'ampolla, el qual l'havia comprat a una tenda virtual americana, i es podia connectar a una manxa de bicicleta. Ens vam trobar, va ser molt amable i em va donar un filtre, un tub i una petita llançadora en perfecte estat que encara guardava. Aquí una foto del coet amb el filtre enroscat:



- El següent problema va ser que en la llista de materials, en dossier posa que hem d'utilitzar una làmina de PVC per a la fabricació d'ales. Com que no especificava el grossor, quan la vaig comprar no em vaig adonar que m'havien donat una bastant gruixuda, la qual s'havia de tallar amb serra. El primer inconvenient que porta això és que en el pas de fer pestanyes per enganxar les ales, el plàstic gruixut no es pot doblegar, i si és més prim (en vaig comprar un altre més prim) era fàcil que es doblegués sol. El segon inconvenient és que, com hem dit a la hipòtesi, s'ha d'estalviar el màxim pes a la part inferior del coet per tal de que el CG estigui el més avançat possible, i que les ales fossin pesades no ajudava. La solució d'aquest problema va ser substituir el PVC per cartró comercial, el qual és molt lleuger i aguanta les ràfegues de vent laterals. Aquí una fotografia primer de les ales de PVC i després del cartró:



-Això no seria ben bé un problema però resulta que en el dossier la plataforma de llançament estava dissenyada per tal que es poguessin fer llançaments amb diferents angles possibles, però després de comprar-ho vaig caure en que pel meu treball no feia falta aquesta secció de la plataforma, ja que només estudiarem el moviment dels coets i la seva estabilitat per vols verticals, ja que són el tipus de trajectòria que segueix un coet real en el primer tram de recorregut, així que només vaig utilitzar la taula principal de llançament



3.3.2 Primers llançaments i problemes pertinents

Després de solucionar tots els obstacles de la construcció ja vam poder realitzar els llançaments. En total n'hi ha 12 llançaments fets, es poden trobar en el arxiu adjunt al treball (USB) on hi són tots els vídeos i imatges de la part experimental. Estan agrupats en dies, ja que en un dia es poden fer més d'un llançament, fins que el coet es faci molt malbé o se'ns acabi l'aigua.

El llançament d'un coet d'aigua funciona de la següent manera: En una esplanada gran, ja sigui un parc o un descampat, hi col·loquem la plataforma de llançament ben estable i allunyat de qualsevol arbre o objecte que pugui dificultar o intervenir en el vol. Com a mínim, si es vol enregistrar el llançament en vídeo, hi ha d'haver dos persones gravant, una des de més a prop amb un mòbil perquè s'aprecii bé el vol del coet, i una càmera estàtica més lluny perquè es vegi bé la trajectòria o paràbola que aquest segueix

· Prova 1 i 2

Aquestes dos primeres proves daten del dia 9/07. Va ser el dia que vaig acabar de construir la plataforma i el coet, vam agafar el cotxe i vam anar al parc de llançament. Aquests dos primers llançaments no són per recollir-hi dades, són dues proves per prendre-hi contacte i mirar si tot surt bé i el coet vola.

Com que no tenia idea de quina quantitat de combustible posar-li, vaig provar amb dos terços del coet més o menys (recordem que és un coet amb 1,5L de capacitat). Quasi no vaig fer tres inflades amb la manxa que ja va sortir, fent una paràbola molt petita i curta, ja que, com hem dit a la part teòrica, quan més pes hi ha més baix es situa el Centre de Gravetat respecte el Centre de Pressions (aquest últim no varia ja que depèn de la superfície) i més inestabilitat hi ha com a conseqüència. Tant és així que quan vaig recollir el coet encara hi sortia aigua de dins, es a dir, no li havia ni donat temps de buidar tot el seu combustible durant el vol. Tot i això vam comprovar que el coet volava bé sense dificultats.



FITXA DE LES PROVES

·Nom: Proves núm. 1 i 2

·Data: 09/07/2016

·Objectiu: Comprovar el vol del coet , anotar possibles errors per solucionar-los i determinar aproximadament quina quantitat d'aigua es necessària perquè surti un vol mínimament estable. Gravar-los des de dos perspectives, una amb mòbil i l'altra amb càmera.

·Resultat: Prova 1 surt molt inestable i altura de pocs metres, ja que tenia aproximadament un 60 o 70% d'aigua, i prova 2 més estable i molta més alçada ja que té d'un 30 a un 40% d'aigua, però no descriu un moviment prou vertical. El segon llançament no surt complet gravat des de lluny.

·Conclusions: La quantitat ideal d'aigua es troba entre un 20% i un 40%. Pel que fa a la gravació, si es fa amb mòbil s'ha d'estar molt atent a la sortida del coet, i si és fa amb càmera

·Assoliment de l'objectiu: favorable.

La següent prova va ser amb una mica menys de combustible, aproximadament un terç. Va ser per això que va realitzar un vol més alt i més parabòlic. Es va veure que era un petit problema, ja que havies d'estar atent a la sortida del coet i seguir-lo amb la gravació.



·Prova 3,4,5 i 6

Aquestes 4 proves daten del dia 15/07 i van ser 4 proves de demostració de com era el llançament d'un coet d'aigua i aire a pressió. Totes van ser realitzades amb 500 ml de combustible d'aigua, amb un vent moderat. Van sortir unes alçades bastant elevades, i la majoria bastant verticals, però no es van poder mesurar ja que eren vols de demostració, gravats amb mòbil i inservibles per fer mesures reals i tangibles amb el Kinovea.



FITXA DE LES PROVES

·Nom: Proves núm. 3,4,5 i 6

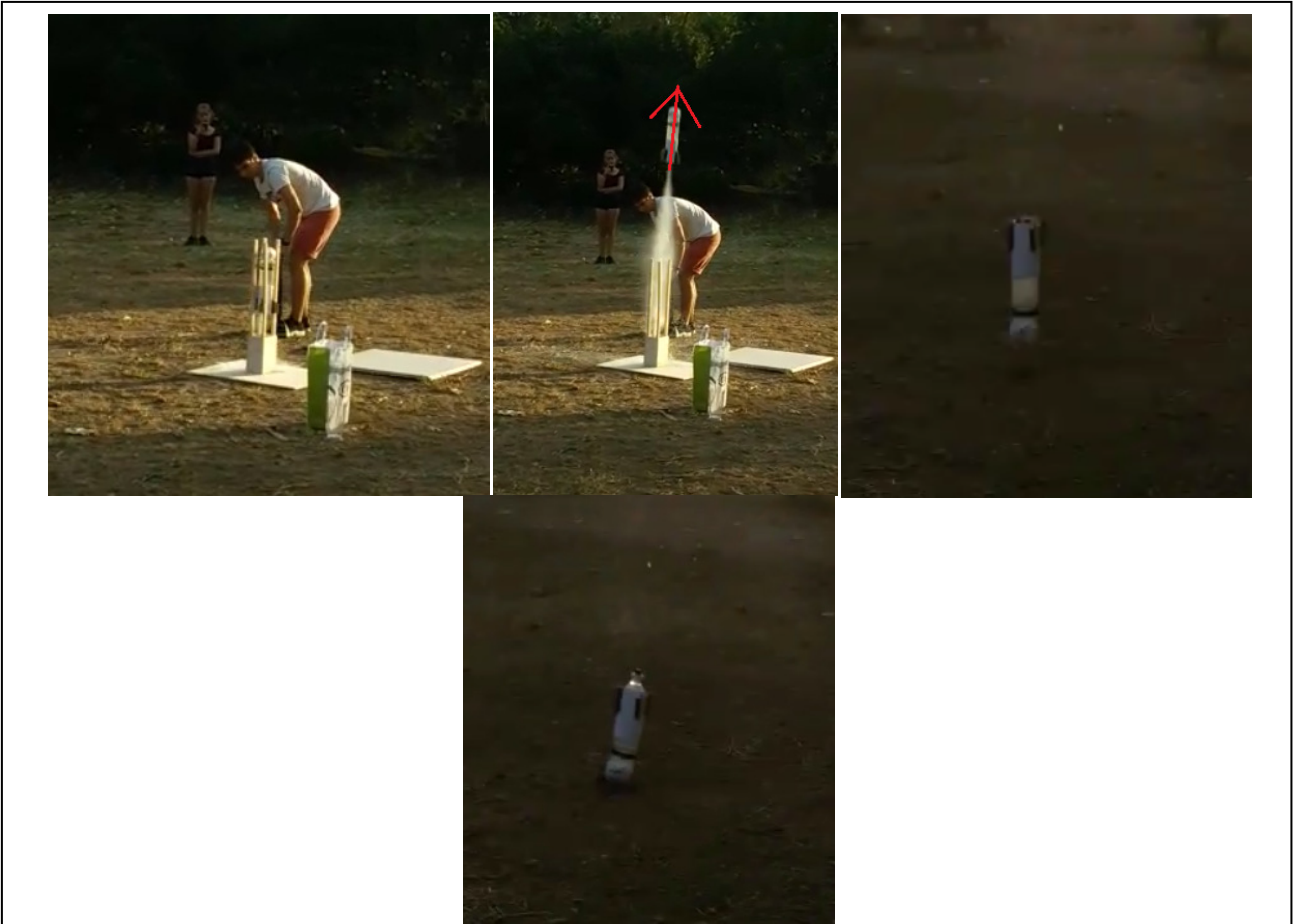
·Data: 15/07/2016

·Objectiu: gravar llançaments de mostra amb mòbil per alentar-los després amb l'ordinador i que es pugui apreciar els tres tipus de moviment d'un coet: translació, gir i rotació.

·Resultat: Com tots els llançaments són realitzats amb 550 ml d'aigua, tots surten quasi bé perfectes menys un que surt bastant desviat i no gaire vertical, segurament per que no tenia una posició totalment recta al introduir-lo dins la plataforma.

·Conclusions: Comprovo que la quantitat d'aigua ideal pràctica es troba al voltant dels 550 ml d'aigua, i que realment un coet realitza tres tipus de moviment.

· Assoliment de l'objectiu: favorable.



Fotos pertanyents a la prova 6, on s'aprecia en el llançament del coet que, com té una lleugera desviació, el vol surt una mica desviat en conseqüència. També s'observa com es malmet el coet a l'hora d'aterrar. Tots dos són exemples de moviment de translació, rotació i gir.

·Prova 7,8,9 i 10

Aquestes quatre proves daten del dia 30/07, es van realitzar totes en una tarda, i tenien l'objectiu de ser els llançaments que serviren per fer càlculs amb el Kinovea, per tant havien de tenir les següents característiques: Estar gravats en un sol pla horitzontal i perpendicular a la direcció on apunta la càmera, que tinguin bona lluminositat i que tota la trajectòria del coet es vegi dins el pla de gravació. Malauradament, la esplanada on vam realitzar les gravacions amb la càmera no eren prou allunyades per que pogués captar el moviment del coet en el mateix pla, tot i que en el 9 i 10 vaig canviar la posició de gravació, i també van sortir amb molt poca lluminositat perquè es va fer tard i tampoc van sortir en el mateix pla. Tots els llançaments van ser realitzats amb 550 ml d'aigua. Tot i això em van servir per rectificar, i als següents vaig organitzar millor els llançaments.



FITXA DE LES PROVES

·Nom: Proves núm. 7,8,9 i 10

·Data: 30/07/2016

·Objectiu: gravar llançaments definitius per manipular-los després amb els programes pertinents i poder demostrar la hipòtesi i treure-hi informació.

·Resultat: Surten unes gravacions molt fosques per manipular-les després

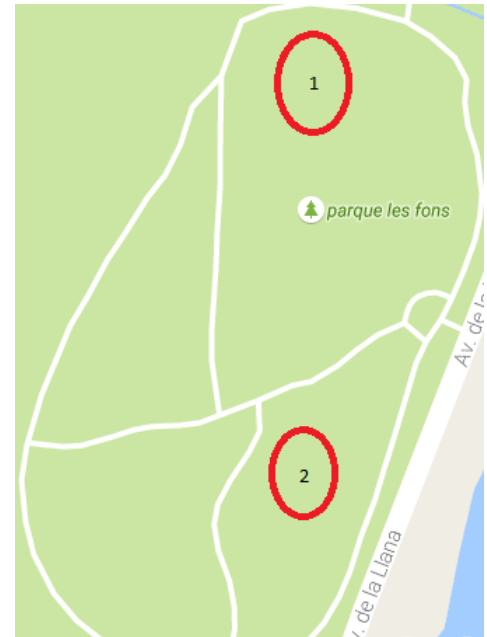
·Conclusions: S'ha de tornar a una hora amb més lluminositat per tal de que els vídeos es vegin bé.

3.3.3 Llançaments mesurats junt als càlculs pertinents

Finalment, després de superar totes les adversitats i problemes, les proves 11 i 12 van ser les definitives per poder fer càlculs.

Primer de tot van ser gravades en una zona del parc (el parc de les Fonts explicat a la introducció d'aquest apartat 3.3) on no hi havia arbres que poguessin malbaratar la trajectòria del coet o obstaculitzar la gravació del moviment d'aquest últim. Per ser més exactes, les proves del 1 al 10 van ser gravades al lloc 1, mentre que la 11 i 12 al lloc 2.

La trajectòria del coet en aquests llançaments va ser profitosa, ja que estava en un pla quasi perpendicular a la direcció de gravació, per tant es podien treure resultats creïbles amb el Kinovea.



Abans d'explicar les mesures definiré breument els programes utilitzats i la seva fiabilitat:

- Cinta mètrica d'error +/- 0,1 m, ja que les distàncies d'abast final eren mesurades allà mateix.
- Kinovea: Programa informàtic que, entre d'altres utilitats, fa mesures en un vídeo en base a una mesura prèvia que hem assignat anteriorment. Hem de tenir en compte que les mesures que extraïem no són del tot exactes, ja que tenim la probabilitat d'error de que el pla on està gravat el vol del coet no sigui perpendicular a la càmera o bé que ens podem equivocar a l'hora de posar la mesura dins el programa. Aquest és un programa solament d'anàlisi i modificació de vídeo, ja que hi podem incrustar les mesures fetes.
- Multilab: Al igual que el Kinovea, el Multilab fa mesures en base a una mesura assignada, però no deixa incrustar aquestes últimes. El que sí permet aquest programa és recrear la trajectòria descrita pel coet dient on està aquest a cada fotograma, per tal de tenir un seguit de punts que formin el vol del coet. També permet dir a quina funció s'assembla la trajectòria per mitjà d'un ajustament de punts, i dir-ne la seva regressió.
- Qualsevol reproductor de vídeo per poder parar fotograma a fotograma i dir en quin moment comença cada tram de trajectòria, ja que una trajectòria està formada pel tram primer on el coet expulsa aigua, i un tram segon fruit d'una velocitat inicial v_0 assolida en el primer tram.

Les dades corresponents a cada llançament són les següents:

·Prova 11

Quantitat d'aigua: 400 ml

Abast final relatiu (x_{fr}): 5,60 m (relatiu ja que contem el desplaçament que ha fet al impactar contra el terra)

Amb aquestes dades, podem fer que el Kinovea agafi l'abast màxim com a mesura d'escala, i que ens digui quina alçada ha assolit.



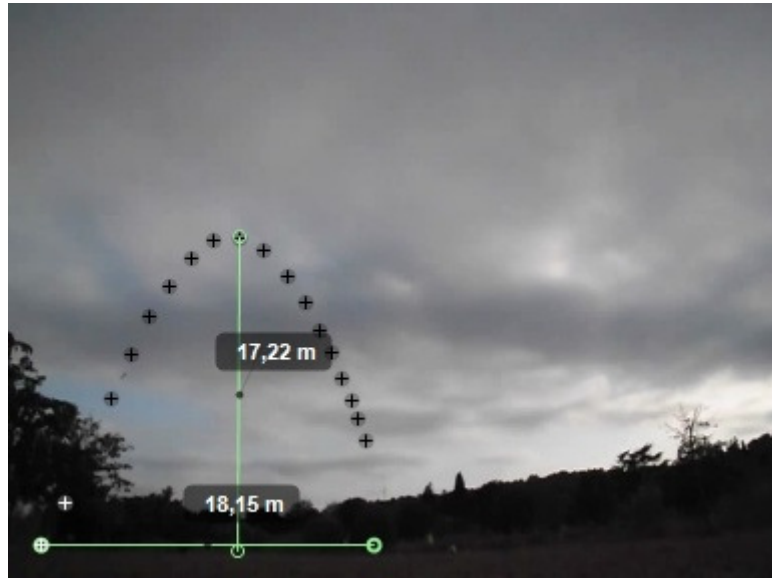
Parant cada fotograma podem identificar el punt més elevat, i quan el mesurem ens surt 20 metres, i 4 metres d'abast real. És una paràbola bastant estilitzada, on podem afirmar que té una bona estabilitat, ja que el vent en aquell moment era quasi nul.

· Prova 12

Quantitat d'aigua: 600 ml

Abast final relatiu (x_{fr}): 18,15 m

Mesurant amb el Kinovea:



Com era d'esperar, surt una paràbola molt oberta, demostrant la inestabilitat del coet causada per l'augment de combustible. Surt 17 metres d'alçada màxima, 3 menys que la prova 11, i 18 metres d'abast màxim, quasi 5 vegades més que la prova 11.

Resultats:

	Alçada màxima ($y_{màx}$)	Abast màxim ($x_{màx}$)	Temps total (t)	Temps expulsant combustible (t_1)	Temps posterior a l'expulsió (t_2)
Prova 11	19 metres	4 metres	4,2 segons	0,2 segons	4 segons
Prova 12	17 metres	18 metres	4 segons	0,4 segons	3,6 segons

Amb aquestes dues proves es demostra la hipòtesi anunciada: El vol perfecte, es a dir, un vol completament vertical, d'un coet depèn de la posició del Centre de Gravetat respecte el Centre de Pressions. En el primer llançament el CG estava més cap a la ogiva ja que tenia poc combustible, en canvi en el segon li hem augmentat el combustible 200 ml, es a dir un 50%, traslladant el CG més cap al cos del coet i perdent estabilitat. El temps total de la prova 11 és més gran ja que era més lleuger i triga més a caure.

Tot i això estudiarem alguns aspectes més d'aquests dos vols. El primer serà determinar el CG amb 600 ml i 400 ml d'aigua respectivament, i veure com afecta aquest canvi de pes al Marge d'Estabilitat, es a dir, a la distància respecte el CP, el qual es manté constant ja que no hem variat la superfície.

El segon serà determinar la trajectòria descrita pel coet amb el programa Multilab i, amb l'ajustament de funció, veure a quina funció matemàtica se li assembla més i calcular-hi la regressió, per saber si s'allunya molt o no de la corba ideal que hauria de realitzar el coet.

· Càlcul del CG i CP

Primer calcularem el Centre de Pressions ja que, com no variem la superfície, és constant. Per fer-ho ens basarem en un apartat del dossier de *Modelismo Espacial* en el qual s'expliquen les equacions matemàtiques de Barrowman, anomenades així per el seu creador l'enginyer aeroespacial James Barrowman, les quals consta de dividir el coet en vèries parts, calcular la distància on es troba el coeficient normal (C_{Na}), un coeficient directament relacionat amb la Força Normal (F_N) que actua sobre el coet, la qual a la vegada relacionada amb el Centre de Pressions, respecte una línia horitzontal de referència situada a la punta més alta del coet en cadascuna i fer la mitja per trobar la distància del CP total respecte la línia (FIG. 125).

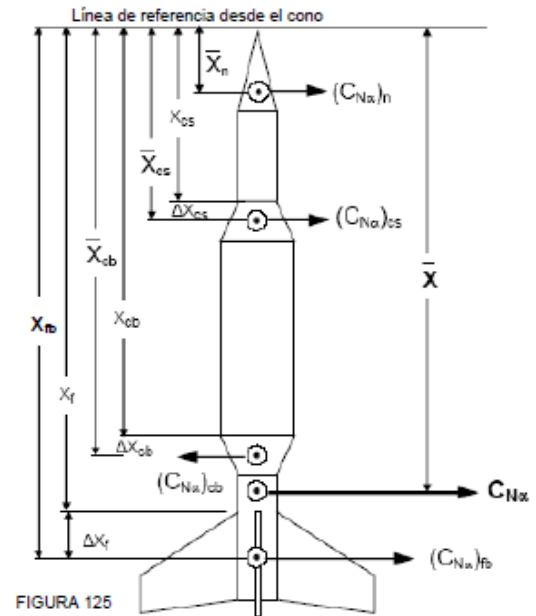
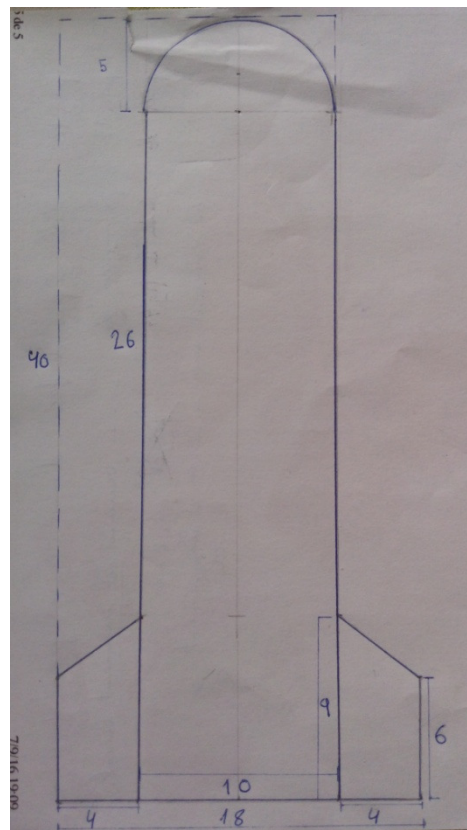
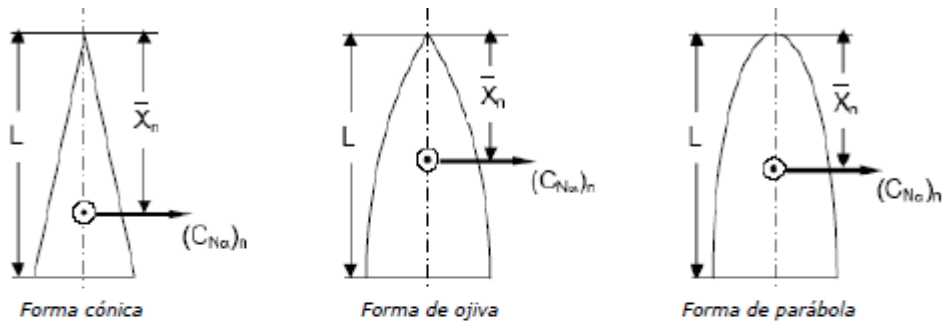


FIGURA 125

Aquest dibuix representa les mides del nostre coet a escala 1:2 :



Com podem observar el nostre coet consta de tres parts, el con, el cos i les aletes. Comencem pel con del coet. Segons les equacions de Barrowman, en general, independentment de la forma, el coeficient normal tindrà un valor de 2 per totes les formes del con. Tot i això, per calcular la distància d'aquest, depenent de la forma de la secció longitudinal del con utilitzarem una o altra equació:



Para la forma cónica, la localización del CP es:

$$\bar{X}_n = \frac{2}{3} \cdot L$$

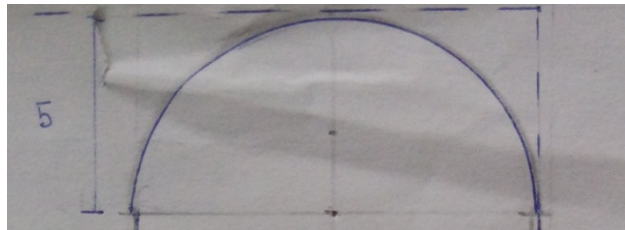
Para la forma en ojiva, la localización del CP es:

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

Para la forma en parábola, el CP se localiza en:

$$\bar{X}_n = \frac{1}{2} \cdot L$$

Tal i com veiem en les figures anteriors, el con del nostre coet té una forma parabòlica de longitud $L = 5 \text{ cm}$:



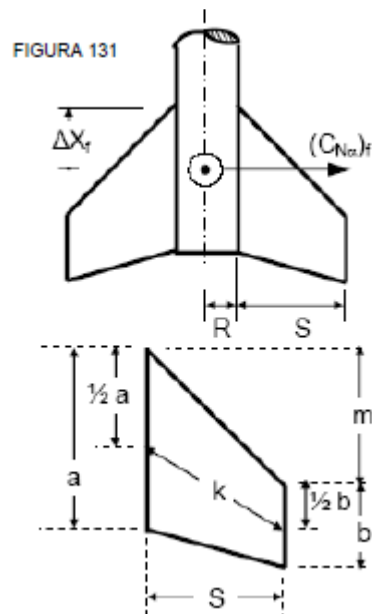
Aleshores:

$$X_{\text{con}} = L \cdot \frac{1}{2} = 5 \cdot 0,5 = 2,5 \text{ cm} = 0,025 \text{ m}$$

Per tant, el coeficient normal en la part capdavantera del coet estarà situat a 2,5 cm, 0,025 m, respecte la punta del coet i té un valor de 2.

Pel que fa al cos del coet, com que estem suposant que el nostre coet tindrà un angle d'atac pròxim a 0, el fregament és tan petit que el podríem considerar negligible. Aquesta dada es va obtenir en una prova que es va fer durant la 1ª Guerra mundial, en un túnel de vent on es van provar diferents cilindres en direcció al vent.

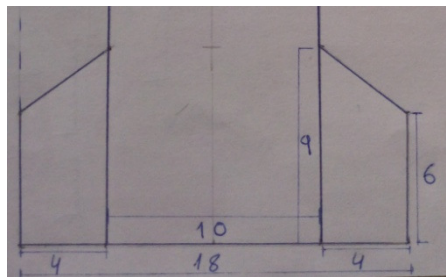
La última part on calcularem la distància del $C_{N\alpha}$ serà les aletes. Les mides en aquesta zona són (FIG: 131):



El $C_{N\alpha}$ es calcula amb la següent equació:

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

On n és el nombre d'aletes (4 aletes) i d és el diàmetre del cos on estan ubicades (10 cm). Amb això ja podem calcular el $(C_{N\alpha})_{aletes}$ en el nostre coet:

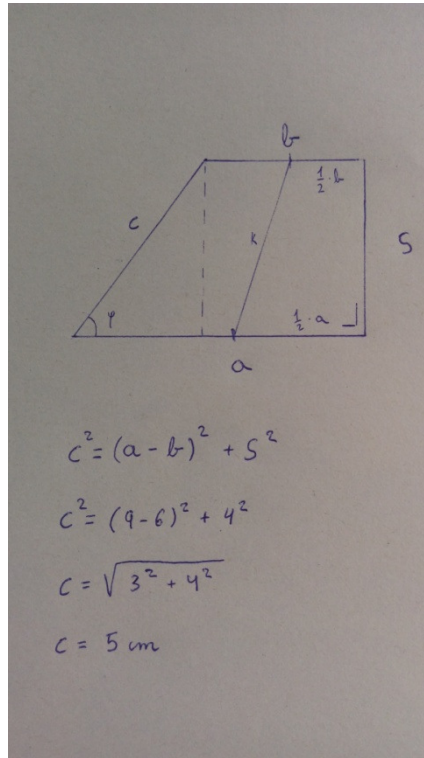


Tenim que:

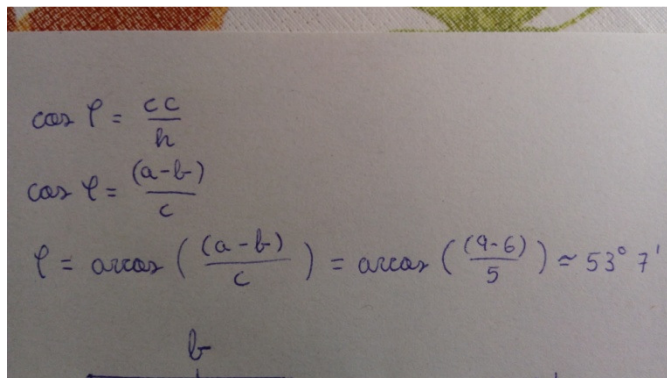
- n = 4 aletes
- S = 0,04 m
- d = 0,10 m
- a = 0,09 m
- b = 0,06 m

Ens falta k , que és la distància de $0,5 \cdot a$ respecte $0,5 \cdot b$.

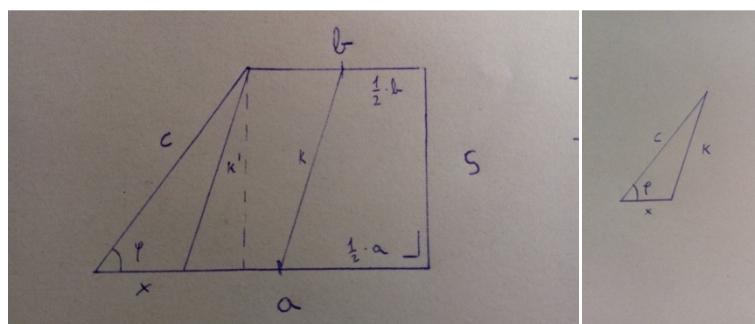
Per trobar-la, ens haurem d'utilitzar trigonometria de 1^{er} de batxillerat. Comencem dibuixant la aleta i trobant el costat que ens falta amb el teorema de Pitàgores:



Per trobar l'angle φ , utilitzarem la relació trigonomètrica del cosinus en un triangle rectangle:



Ara que ja sabem c i φ , dibuixant una paral·lela a k , trobem un triangle on podem treure k :



Quan tenim el triangle només hem de treure k amb el teorema del cosinus:

$$\begin{aligned}
 k^2 &= c^2 + x^2 - 2cx \cdot \cos \varphi \\
 k &= \sqrt{c^2 + x^2 - 2cx \cdot \cos \varphi} \\
 k &= \sqrt{5^2 + (1,5)^2 - 2 \cdot 5 \cdot 1,5 \cdot \cos(\arccos(\frac{3}{5}))} \\
 k &\approx 4,272 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

Ara que ja tenim k ja podem calcular el $C_{N\alpha}$, tornant a l'equació anterior:

$$\begin{aligned}
 (C_{N\alpha})_{aletes} &= \frac{4 \cdot n \cdot (\frac{S}{d})^2}{1 + \sqrt{1 + (\frac{2 \cdot k}{a+b})^2}} = \frac{4 \cdot 4 \cdot (\frac{0,04}{0,10})^2}{1 + \sqrt{1 + (\frac{2 \cdot 0,0427}{0,09 + 0,06})^2}} \\
 &= 1,19
 \end{aligned}$$

Malgrat això, no hem acabat encara. El coeficient normal en les aletes té una peculiaritat, i és que està influenciat per l'aire que passa per la superfície de les aletes i la secció del cos a on hi estan unides. Aquesta influència s'anomena factor d'interferència i es representa amb una k_{fb} i l'hem de tenir en compte a l'hora de calcular el $C_{N\alpha}$. El factor d'interferència està determinat per la següent equació:

$$k_{interf} = 1 + \frac{R}{S + R} = 1 + \frac{0,05}{0,04 + 0,05} = 1,5$$

Per tant, el $C_{N\alpha}$ total en les aletes serà:

$$C_{N\alpha} = (C_{N\alpha})_{aletes} \cdot k_{interf} = 1,19 \cdot 1,5555 = 1,85$$

Ara calcularem la distància d'aquest. Es calcula com a conjunt, donat per aquesta equació:

$$X_{aletes} = X_f + \frac{m \cdot (a + 2 \cdot b)}{3 \cdot (a + b)} + \frac{1}{6} \cdot (a + b - \frac{a \cdot b}{a + b})$$

On X_f és la distància des de la línia de referència fins al punt on comença l'aleta, el qual val 0,31 m, i $m = a - b = 0,03$ m. Per tant la distància X_{fb} serà:

$$X_{aletes} = 0,31 + \frac{0,03 \cdot (0,09 + 2 \cdot 0,06)}{3 \cdot (0,09 + 0,06)} + \frac{1}{6} \cdot (0,09 + 0,06 - \frac{0,09 \cdot 0,06}{0,09 + 0,06}) = 0,343 \text{ m}$$

Ara que ja tenim els dos coeficients normals amb les seves respectives distàncies ja podem calcular el Centre de Pressions. Per fer-ho calculem el coeficient normal total, que seria el mateix que calcular la Força normal total:

$$C_{N\alpha} = \sum C_{N\alpha} = (C_{N\alpha})_{con} + (C_{N\alpha})_{aletes} = 2 + 1,85 = 3,85$$

I ara només falta fer la mitja:

$$X_{CP} = \frac{(C_{N\alpha})_{con} \cdot X_{con} + (C_{N\alpha})_{aletes} \cdot X_{aletes}}{C_{N\alpha}} = \frac{2 \cdot 0,025 + 1,85 \cdot 0,343}{3,85} = 0,18 \text{ m}$$

Per tant, el Centre de Pressions del nostre coet està situat a 18 cm de la punta del con si considerem que el coeficient normal en el cos del coet és 0 i, per tant, que tenim un angle d'atac igual o pròxim a 0.

Ara passem a calcular el Centre de Gravetat sense combustible, amb 400 i amb 600 ml.

Per fer-ho hem de posar el coet horitzontalment i buscar, amb un fil, una corda o amb el dit el punt on s'equilibra la massa i no balanceja:



El resultat és que sense aigua el Centre de Gravetat està situat a 20 cm de la punta del coet, amb 400 ml està ubicat a 26 cm i amb 600 ml està a 28 cm. En els dos últims càlculs he hagut de congelar l'aigua en el congelador de l'institut a causa de que, per calcular on estava el CG, com es veu a la foto anterior, havia de girar horitzontalment el coet, i si ho feia amb aigua líquida aquesta es repartia per tot el coet, fet que impedia que pogués calcular el CG com quan el coet està vertical i amb l'aigua a la part inferior.



Només aquests resultats són tota una sorpresa, ja que significa que el coet ja és una mica inestable inclús sense combustible perquè el Centre de Gravetat està per sota del Centre de Pressions.

	Distància del Centre de Gravetat (X_{CG})	Centre de pressions (X_{CP})	Marge d'estabilitat ($X_{CP} - X_{CG}$)
0 ml	0,20 m	0,18 m	-0,02 m
400 ml	0,26 m	0,18 m	-0,08 m
600 ml	0,28 m	0,18 m	-0,10 m

En aquest punt em veig obligat a aturar els treballs i reflexionar sobre les dades obtingudes. Em plantejo els següent problema: Hi ha una incoherència entre els resultats de les proves i els resultats teòrics: segons els càlculs del CG i CP existeix una inestabilitat molt considerable que no es veu res reflectida en les proves, ja que hi ha una gran diferència entre la prova 11, la qual és quasi vertical i amb un desplaçament horitzontal x de només 4 metres respecte als 19 d'alçada màxima, i la prova 12 que recordem que el coet es va desplaçar horitzontalment fins a 18 metres respecte els 17 d'alçada.

Això va sumat al fet que la localització del CP no és lògica, m'explico: El Centre de Pressions, si fem memòria, és el centre imaginari en el qual podem representar-hi totes les forces aerodinàmiques que actuen en el coet com a una sola força que representaria el sumatori de les anteriors, es a dir, que per sobre del centre hi actuaria les mateixes forces que per sota. D'això en podem deduir que el CP depèn de la superfície, i no es coherent que en la secció vertical d'un coet on tenim que el con té menys superfície que les aletes, es a dir, que en la part superior hi ha menys superfície que en la part inferior, el CP es situï per sobre de la meitat de l'alçada total (18 cm respecte la punta superior del coet).

Cal remarcar que les equacions de Barrowman emprades només serveixen si el coet compleix els següents requisits:

- a) Que l'angle d'atac sigui pròxim a 0.
- b) Que la velocitat del coet sigui inferior a la del so (menys de 180 m/s).
- c) Que l'aire que actua sobre el coet sigui uniforme y no variï sobtadament.
- d) Que el model sigui proporcionalment prim en relació a la seva longitud.
- e) Que el con del coet estigui acabat en punta.
- f) Que el coet sigui un cos rígid y axialment simètric.
- g) Que les aletes siguin superfícies planes y primes.

Per tant pot ser que com el nostre coet no compleix estrictament aquestes premisses les equacions no hagin sortit bé.

Davant aquestes reflexions decideixo contrastar els resultats amb dos mètodes alternatius per calcular el CP. Un és el mètode del Centre de l'Ala Lateral explicat en l'apartat d'ubicació del CG i CP, el qual consta de calcular el CP en base a calcar la forma del coet en un cartró, retallar-ho i calcular el CG en el cartró. Això es tradueix a fer una secció horitzontal i determinar quin és el punt on es divideix la superfície en dos parts iguals. No el pensava

utilitzar per el seu marge d'error i aproximació, però en la tessitura que em trobo, és la opció que més idea em donarà d'on està el CP i si les equacions de Barrowman no m'ho han dit correctament.

L'altre mètode se'm va acudir a mi i l'anomenaré d'ara en endavant mètode del Rectangle Inscrit. Aquest mètode parteix de les següents bases:

- Donat un rectangle i un vent uniforme actuant perpendicularment en tota la seva superfície, el CP es situarà en el punt mig de la figura geomètrica, ja que davant i darrere de qualsevol eix que passi per CP hi actuaran les mateixes pressions.
- La distància del Centre de Pressions respecte un punt de referència en una superfície bidimensional variarà proporcionalment al percentatge de superfície extreta del rectangle més petit on estigui inscrit dita figura fins arribar a la figura principal.
- La premissa anterior s'aplica a les seccions vertical i horitzontal d'un cos, ja que qualsevol vent oblic uniforme es pot descompondre en components sinus i cosinus.
- El Centre de Pressions Total de la secció es calcularà a partir de les alçades obtingudes, totes des d'un mateix punt de referència, multiplicades cadascuna per la fracció de les superfícies que pertanyen respecte la superfície total de la secció.

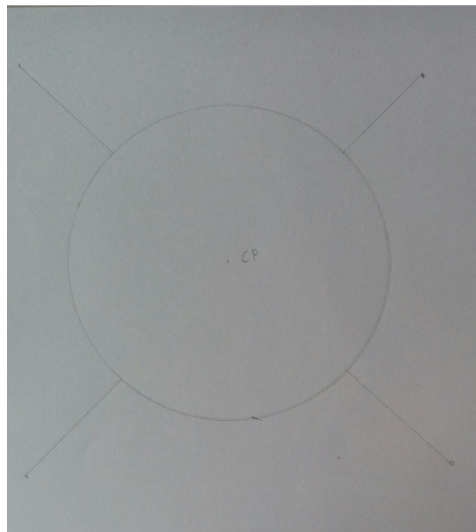
Aquest mètode menysprea la viscositat de l'aire o medi en que es mogui el cos i considera el cos com a diferents parts de dues seccions, la vertical i l'horitzontal, es a dir, la planta i l'alçat.

Primer calculem el CP amb el mètode del Centre de l'Ala Lateral, i ho contrastem amb el mètode del Rectangle Inscrit. Calquem el coet en un cartró i ho retallem.

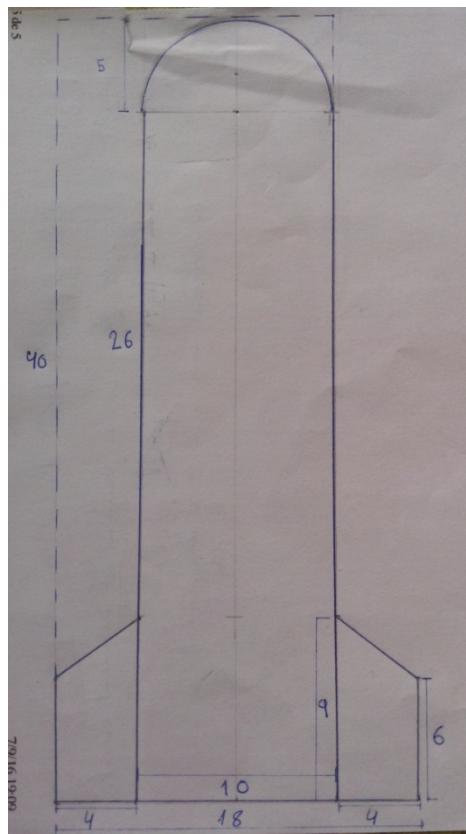


Busquem amb el dit o amb el llapis el punt d'equilibri tal i com ho hem fet abans amb el coet normal i mesura 23 cm des de la punta del coet. Aquest resultat ja és molt més coherent amb les proves realitzades, i dona a entendre que les equacions de Barrowman no ens han donat el resultat òptim (no dic que siguin errònies, sinó que pel nostre cas no ens han anat bé, sigui quina sigui la causa).

Ara contrastarem els resultats amb el mètode del Rectangle Inscrit. Comencem per crear la secció vertical del nostre coet:

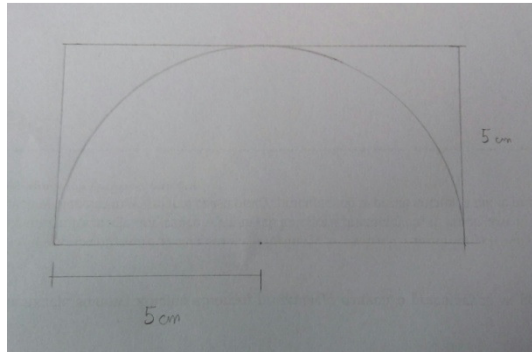


Aquesta secció no té molt secret, a simple vista es veu que el CP està en el centre de la circumferència, ja que qualsevol eix que passi per aquest centre dividirà la superfície en dos parts iguals. Igualment, això ens diu que, quan treballem amb la secció horitzontal, ja sabrem on estarà el Centre de Pressions horitzontal, es a dir, a l'eix vertical de simetria. Passem a estudiar la secció horitzontal, inserida anteriorment.



Agafant com a punt de referència l'eix horitzontal que passa per la punta del coet, dividirem la secció en tres parts: el con, el cos, i la part baixa.

Comencem calculant en el con.



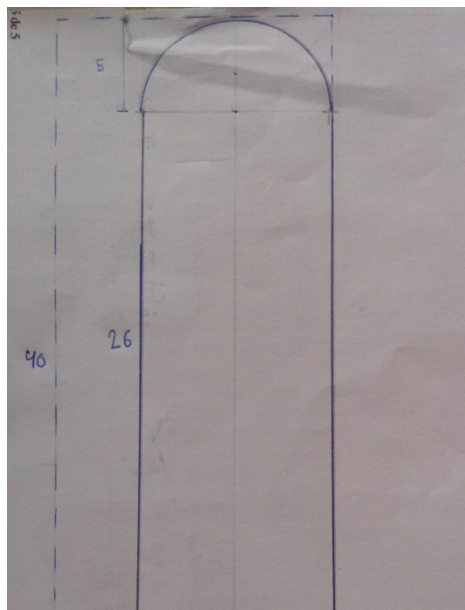
Veiem que el percentatge de superfície que li hem tret al rectangle inscrit per arribar a la mitja circumferència s'expressa mitjançant la següent equació:

$$\%_{\text{superfície extreta}} = \left(\frac{(r \cdot 2r) - ((\pi \cdot r^2)/2)}{r \cdot 2r} \right) \cdot 100 = 21,46018 \%$$

Per tant, la distància del CP en el con estrarà a 2,5 cm (CP en el quadrat inscrit) sumat el 21,46% de 2,5:

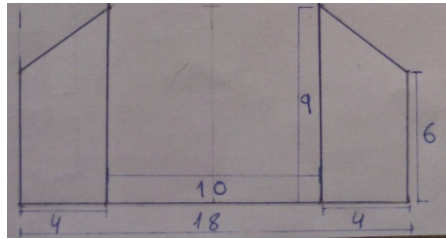
$$\bar{X}_{\text{con}} = 2,5 + \frac{21,46018}{100} \cdot 2,5 = 3,0365045 \text{ cm}$$

En el cos, com ja és un rectangle, el CP es situarà a la meitat de la figura:



$$\bar{X}_{\text{cos}} = r + \frac{l}{2} = 5 \text{ cm} + 13 \text{ cm} = 18 \text{ cm}$$

Per últim, calcularem el % de la superfície estreta en la part baixa.



$$\%_{\text{superfície estreta}} = \frac{\left(\frac{(9-6) \cdot 4}{2}\right) \cdot 2}{18 \cdot 9} \cdot 100 = 7,407\%$$

Per tant, la distància del CP en la part baixa serà:

$$\bar{X}_{\text{baix}} = 26 + 5 + \left(\frac{9}{2}\right) + \left(4,5 \cdot \frac{7,407}{100}\right) = 35,833315 \text{ cm}$$

Ara ja tenim les distàncies de les diferents parts, només falta calcular quina fracció respecte la superfície total té cada part i multiplicar-ho per cada distància:

$$S_{\text{total}} = S_{\text{con}} + S_{\text{cos}} + S_{\text{baix}} = \left(\frac{\pi \cdot 5^2}{2}\right) + (26 \cdot 10) + ((18 \cdot 9) - 3 \cdot 4) = 449,2699 \text{ cm}^2$$

$$\bar{X}_{\text{total}} = \bar{X}_{\text{con}} \cdot \frac{S_{\text{con}}}{S_{\text{total}}} + \bar{X}_{\text{cos}} \cdot \frac{S_{\text{cos}}}{S_{\text{total}}} + \bar{X}_{\text{baix}} \cdot \frac{S_{\text{baix}}}{S_{\text{total}}} = 22,64 \text{ cm}$$

Aproximadament els 23 cm que ens han sortit amb el mètode de Centre de l'Ala Lateral. Tot i això cal remarcar que el mètode del Rectangle Inscrit pot ser que només serveixi per aquest cas i està pendent de comprovació, demostració i de sotmetre's a proves.

Tot i això tornant a l'estabilitat el coet, ara sí que es veu una bona estabilitat del coet.

	Distància del Centre de Gravetat (X_{CG})	Centre de pressions (X_{CP})	Marge d'estabilitat ($X_{CP} - X_{CG}$)
0 ml	0,20 m	0,23 m	0,03 m
400 ml	0,26 m	0,23 m	-0,03 m
600 ml	0,28 m	0,23 m	-0,05 m

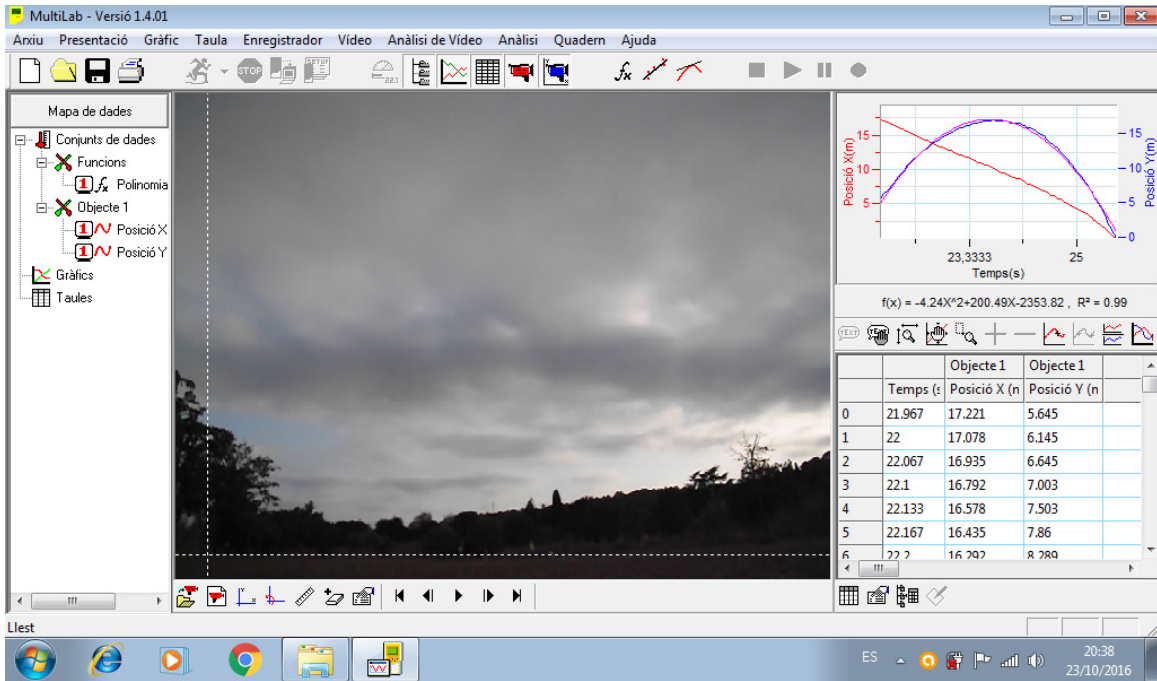
·Ajustament de funció amb el Multilab

Un cop ja hem resolt els problemes del CG i CP passem a treballar amb el Multilab. El Multilab és un programa bastant complet, nosaltres en el nostre treball només utilitzarem la part d'anàlisi de vídeo, tot i que hi ha altres funcions. Primer obrim el vídeo que volem utilitzar i el propi programa ens para fotograma a fotograma per què nosaltres puguem indicar on està el coet a cada instant.

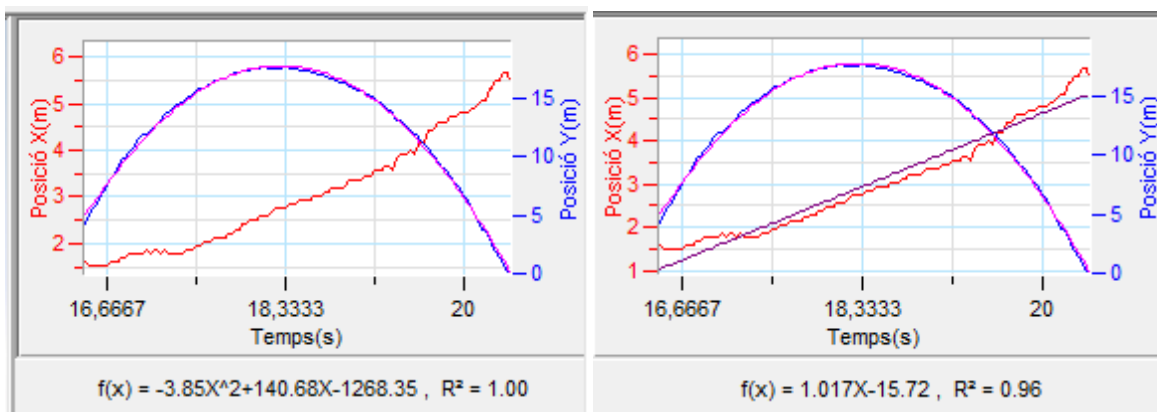
Cal remarcar que això ja ens ho feia també el Kinovea, ja que hi marcaves un objecte i el propi programa et feia el seguiment de la seva trajectòria a mesura que avançava el vídeo,

però resulta que en el nostre cas, el vídeo estava gravat tan de lluny perquè es pogués veure tota la trajectòria que el programa no detectava el coet i, per tant, no el seguia.

Tornant al Multilab, quan marquem l'objecte a cada fotograma ens fa una taula on hi surten tres components: el temps (t), la distància (x) i l'alçada (y) en base a una mesura de referència i un origen de coordenades que hem situat anteriorment.



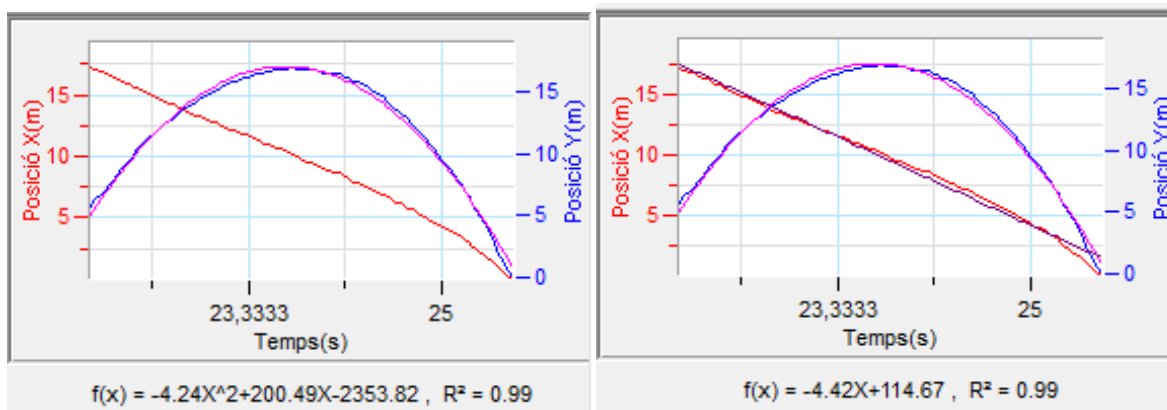
Quan hem acabat de marcar tots els fotogrames el coet ens representa les dades obtingudes amb un gràfic on s'hi representa $y(t)$ i $x(t)$. Mitjançant un ajustament lineal (una funció del programa) El programa ens dona la funció matemàtica que més s'ajusta a la nostra gràfica i la seva regressió pertinent. De la prova 11 tenim:



$$y(t) = -3,85t^2 + 140,68t - 1268,35 \text{ amb } R = 1,00$$

$$x(t) = 1,017t - 15,72 \text{ amb } R = 0,96$$

De la prova 12 tenim:

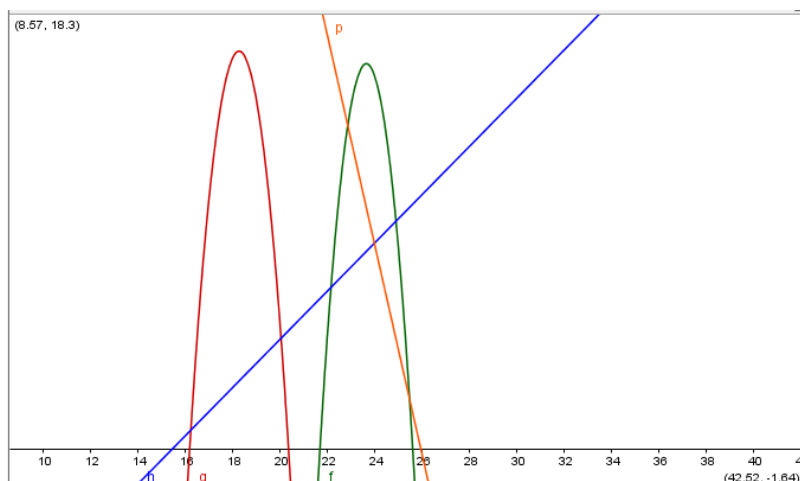


$$y(t) = -4,24t^2 + 200,49t - 2353,82 \text{ amb } R = 0,99$$

$$x(t) = -4,42t + 114,67 \text{ amb } R = 0,99$$

Les regressions veiem que són relatives ja que depenen de les mesures dels eixos de coordenades ja que en la prova 11 la distància x era tan petita comparada amb la prova 12 que es veu més reflectit l'error del cursor de l'ordinador marcant en cada fotograma. En la prova 12 l'origen de coordenades està situat aproximadament en la $x_{\text{màx}} = 18 \text{ m}$ respecte la llançadora, en canvi en la prova 11 l'origen està en la llançadora, és per això que en una la funció té pendent positiva i en l'altre negativa.

A part d'això es veu reflectit el que ja podem veure en els vídeos, la prova 12 té una trajectòria més ampla i inestable, en canvi la prova 11 la trajectòria surt més estilitzada. Per veure-ho més clar utilitzarem el Geogebra, un programa que, entre d'altres utilitats, representa funcions.



Aquí veiem representades les funcions corresponents a les proves (les funcions granat i blava corresponents a la prova 11 i la verda i groga a la 12). Independentment del signe, veiem que les funcions $x(t)$ són més diferents entre si que les de $y(t)$ a causa de que el desplaçament horitzontal varia molt entre les dues proves i, per tant, el pendent de cadascuna és bastant diferent.

3.3.4 Conclusions de la part experimental

Després d'haver resolt tots els problemes teòrics i pràctica, hem pogut comprovar amb les proves número 11 i 12 que un coet serà estable en gran part per la ubicació del Centre de Gravetat i del Centre de Pressions, i el Marge d'Estabilitat entre aquests dos, ja que recordant els resultats:

	Prova 11	Prova 12
Quantitat d'aigua	400 ml	600 ml
Abast màxim	4 metres	18 metres
Alçada màxima	19 metres	17 metres
Temps d'expulsió d'aigua	0,2 segons	0,4 segons
Temps sense expulsar	4 segons	3,6 segons
Distància del CG en el moment de llançament	0,26 metres	0,28 metres
Distància del CG en el moment d'aturada d'expulsió	0,20 metres	0,20 metres
Ubicació del CP	0,23 metres	0,23 metres

Podem concloure el següent:

- Hem verificat que l'estabilitat d'un coet d'aigua ve determinada, en la seva major part, per la ubicació del Centre de Gravetat respecte el Centre de Pressions, ja que en la prova 12 hi ha més combustible, fet que baixava el CG i feia el coet més inestable, doncs aquest últim descriu una trajectòria amb més desplaçament horitzontal que no pas altura màxima comparada amb la trajectòria quasi vertical que fa en la prova 11, amb més altura màxima en comparació a l'abast màxim. **Per tant hem complert l'objectiu principal d'aquest treball, hem contrastat empíricament la hipòtesi principal que vam formular al principi d'aquest Treball de Recerca.**
- Hem comprovat experimentalment que un coet realitza tres tipus de moviments: el de translació, el de rotació i el de gir, els quals es combinen per formar la trajectòria.
- També hem pogut observar directament com les condicions atmosfèriques i el disseny del coet afecten i determinen la trajectòria que tindrà un model de coet.
- Mirant la taula de dalt també hem pogut concloure que, com en la prova 12 ha trigat més a expulsar el combustible i, per tant, a pujar el CG (fet que ha provocat un canvi de direcció en el vol i ha desestabilitzat el coet), la part més crítica del vol d'un coet, on més es pot desestabilitzar, és en els primers segons de llançaments, ja que és on el CG està més baix perquè el coet encara no ha expulsat tot el seu combustible i, per tant, és el moment on el coet és més inestable, per això fem servir les guies en la plataforma, per guiar i donar una bona direcció al coet en els seus primers instants de vol.

4. CONCLUSIONS DEL TREBALL

Concloent ja el treball en sí, hem pogut verificar la hipòtesi mitjançant la part pràctica: els elements que determinen el vol o trajectòria d'un coet són: el disseny del coet, es a dir, com estan ubicats el Centre de Pressions i el Centre de Gravetat i com estan organitzades les diferents parts del coet (con o ogiva, cos i aletes); les condicions atmosfèriques en el moment de llançament i per últim com està situat el coet en el moment d'ignició.

En base a tot al treball fet i estudiat també podem anunciar com ha de ser un coet espacial ideal: ha de tenir el Centre de Gravetat com més amunt possible, es a dir, a la ogiva; i el Centre de Pressions com més baix possible, es a dir, cap a les aletes. És per això que els enginyers aeroespacials han de tenir sempre present la distribució del pes d'un coet (fet que varia el Centre de Gravetat) i la seva superfície (fet que varia el Centre de Pressions), ja que, si ens fixem, en el nostre cas ja es reflexa aquest intent de millorar l'eficiència del coet, ja que hem posat plastilina a la part capdavantera per pujar el CG i les aletes a la part posterior per baixar el CP.

A part d'això, els dissenyadors i enginyers de coets sempre han de jugar amb màxims i mínims, es a dir, construir un coet que amb el mínim pes possible arribi a la màxima alçada desitjable i, per tant, que el motor o combustible generi el màxim impuls sense fer malbé l'estructura del coet i garantir la seguretat de la missió. És per aquest motiu pel qual els enginyers aeroespacials sempre tenen un repte quan se'ls proposa construir un coet per una determinada missió.

Tot això amb la tecnologia actual, ja que, encara que s'han millorat els tipus de combustibles i els dissenys dels coets, no s'ha canviat la seva forma de propulsió més enllà de l'assistència gravitatòria (utilitzar l'atracció gravitatòria dels planetes del Sistema Solar per impulsar la nau).

No obstant, s'estan fent proves de innovadores formes de propulsió de coets que podrien substituir el combustible químic en un futur, com ara bé la propulsió d'ions, la qual ja s'ha provat en diferents missions i s'ha constatat que, encara que no obtingui una acceleració molt gran, són bastant més eficients que els coets de combustible líquid, ja que en la missió Smart 1 només es van utilitzar 82 quilos de Xenó per arribar a la Lluna comparat amb els aproximats 2000000 quilos que va requerir el Saturn V per arribar al mateix destí. També s'estan estudiant altres formes de propulsió com les veles solars o propulsió EM, encara que se'n podria fer un altre treball de recerca només d'aquest tema.

Tornant al nostre treball, després d'haver realitzat tota la part teòrica i tota la part pràctica podem dir que aquest projecte ens ha servit, a part de verificar la hipòtesi, per:

-Aprendre i repassar conceptes físics que ja sabíem o hem sentit a parlar, i veure'ls reflectits en la part pràctica, ja que en els diferents vols del coet es pot apreciar directa o indirectament les nocions explicades a la part teòrica: l'atracció gravitatòria, moment lineal etc.

-Aprendre conceptes nous sobre l'estabilitat de vol d'un coet i comprovar-ho amb els llançaments, i, sobretot, optimitzar els llançaments per tal de que siguin més eficients, es a dir, tenir una idea cada vegada més clara de com ha de ser un coet espacial ideal.

-Aprendre conceptes nous al voltant de l'enginyeria aeroespacial i la seva història.

-Saber com fer un experiment o una pràctica i treure-li profit, aprenent i rectificat els errors i saber extreure'n informació útil.

-Millorar la metodologia i organització de treball, seguint els passos prèviament marcats i complint amb les dates en la mesura del possible.

I ja pel que fa l'àmbit més personal, aquest treball m'ha suposat tota una nova experiència, ja que gràcies a la meva tutora Cristina Rafecas i a tota la gent que m'ha donat suport al llarg del treball he tingut l'oportunitat d'estudiar i fer recerca en un tema que m'agrada molt com és l'enginyeria aeroespacial. Gràcies a aquest treball també he millorat la metodologia d'estudi així com les meves capacitats per aprendre. Resumint, ha sigut un treball pel qual m'he hagut d'esforçar molt però m'ha aportat uns resultats que superen amb escreix les expectatives inicials.

5. BIBLIOGRAFIA

- Mercadé, J., Serra, S., Armengol, M. (2003) Camp gravitatori. Dins Mercadé, J., Serra, S., Armengol, M. *Batxillerat Física 2*, (132-161). Madrid: Mc Graw Hill.
- Organismo de Exploración Aeroespacial de Japón. (2008). *Cohetes de Agua: Manual del Educador*. Japó.
- Jesús Manuel Recuenco Andrés. (2008). *Modelismo espacial* [PDF]. Accessible a <http://www.uv.es/jbosch/PDF/ModelismoCohetes.pdf>. (30/10/2016).
- Wikipedia (2016). *Línea de Kármán* [en línea]. Accessible a https://ca.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnia_de_K%C3%A1rm%C3%A1n (30/10/2016).
- National Weather Service (2016). *Layers of the Atmosphere* [en línea]. Accessible a <http://www.srh.noaa.gov/srh/jetstream/atmos/layers.htm> (30/10/2016).
- FAI (Federació Aeronàutica Internacional) (2016). [en línea]. Accessible a <http://www.fai.org/astronautics/100> (30/10/2016).
- Wikipedia (2015). *Enginyeria aeroespacial* [en línea]. Accessible a https://ca.wikipedia.org/wiki/Enginyeria_aeroespacial (30/10/2016).
- Wikipedia (2015). *Enginyeria aeronàutica* [en línea]. Accessible a <https://ca.wikipedia.org/wiki/Aeron%C3%A0utica> (30/10/2016).
- Wikipedia (2016). *Enginyeria astronàutica* [en línea]. Accessible a <https://ca.wikipedia.org/wiki/Astron%C3%A0utica> (30/10/2016).
- NASA (2014) [en línea]. Accessible a <http://www.nasa.gov/externalflash/RocketScience101/RocketScience101.html> (30/10/2016).
- Barbara Fiore Editora (2016) [En línea] Accessible a http://www.barbarafioreeditora.com/index.php/catalogo/libros/la_carrera_espacial (30/10/2016).
- El Economista (2016) [En línea] *Cronologia de la carrera espacial*. Accessible a <http://eleconomista.com.mx/notas-online/tecnociencia/2009/07/17/cronologia-carrera-espacial> (30/10/2016).
- BBC (2016) [En línea] *Cronologia de la exploración espacial*. Accessible a http://www.bbc.com/mundo/ciencia_tecnologia/2009/07/090714_luna_timeline_mes.shtml (30/10/2016).
- Wikipedia (2016) [En línea] *Coet*. Accessible a <https://ca.wikipedia.org/wiki/Coet> (30/10/2016).

- Wikipedia (2016) [En línea] *Vuelo suborbital*. Accessible a https://es.wikipedia.org/wiki/Vuelo_suborbital (30/10/2016).
- Wikipedia (2016) [en línea] *Modelisme Espacial*. Accessible a https://ca.wikipedia.org/wiki/Modelisme_espacial
- Aquemarropa (2015) *Gravedad Cero. Vuelos parabólicos en un avión*. Accessible a <http://aquemarropa.es/gravedad.html>
- Wikihow (2016) *Como hacer un cohete con una botella*. Accessible a <http://es.wikihow.com/hacer-un-cohete-con-una-botella>
- Wikipedia (2016) *Anexo: Misiones espaciales*. Accessible a https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Misiones_espaciales
- James S.Barrowman, Judith A.Barrowman (1966) *The theoretical prediction of the center of pressure*. Accessible a https://www.apogeerockets.com/downloads/PDFs/barrowman_report.pdfhttps://www.apogeerockets.com/downloads/PDFs/barrowman_report.pdf

Altres webs d'interès:

https://es.wikipedia.org/wiki/Yuri_Gagarin

https://ca.wikipedia.org/wiki/Alan_Shepard

https://ca.wikipedia.org/wiki/Exploraci%C3%B3_espacial

https://es.wikipedia.org/wiki/Programa_Apolo

<https://ciudad-futura.net/tag/nasa/>

<http://freaktm.com/posters-chulos-de-multiples-temas/>

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Partes_Basicas_Modelo_Espacial.jpg

<http://www.rocketmime.com/rockets/Barrowman.html>