

Enginyeria Electrònica i Automàtica Industrial

ESTUDI I CONSTRUCCIÓ D'UN COET

Memòria

Mark Rodríguez Gerritsma
PONENT: Josep López Xarbau

PRIMAVERA 2020

Agraïments

A Josep Xarbau per fer possible i donar-me suport amb aquest projecte.

A Pol Caballero per les idees i les hores que ha dedicat a fer la PCB amb la CNC.

A Chiara Villanueva per ajudar-me a mantenir la motivació i donar-me suport quan estava amb pocs ànims.

A Frank Salinas per ensenyar-me a fer peces complicades i plànols amb Solidworks

A la comunitat de GitHub i Micropython per desenvolupar el Firmware i les llibreries.

A la comunitat de KiCad per desenvolupar un programa gratuït tan complet

Finalment, als meus pares, per tota l'ajuda i suport al llarg de tots aquests anys.

Resum

Aquest projecte consisteix en la construcció d'un prototip de model coet d'uns 900 cm propulsat per combustible sòlid i amb apertura de paracaigudes controlada per microcontrolador. Aquest és un STM32F411 programat amb Micropython, disposa de diferents sensors i enregistra dades en una targeta microSD. També disposa d'una antena UART que l'hi permet comunicar-se per amb un ordinador i enviar les seves coordenades i altitud en temps real (entre altres). En la memòria es tracta una mica la història dels coets i hi ha recopilada informació i documentació que s'ha fet servir per a construir el prototip i realitzar la seva programació. S'ha elaborat doncs el codi, plànols elèctrics, models 3D, plànols d'aquests, simulacions i un prototip funcional.

Resumen

Este proyecto consiste en la construcción de un cohete de unos 900 cm propulsado por combustible sólido i con apertura de paracaídas controlada por un microcontrolador. Este microcontrolador es un STM32F411 programado en el entorno Micropython; dispone de diferentes sensores y registra los datos en una tarjeta microSD. También dispone de una antena UART que le permite comunicarse en tiempo real con un ordenador y transmitir sus coordenadas y altitud (entre otros). En la memoria del proyecto hay documentación e información usada para la construcción del prototipo y su programación, así como un pequeño inciso en la historia de la cohetería. Se ha elaborado el código del microcontrolador, planos eléctricos, modelos 3D, planos de estos, simulaciones y un prototipo funcional.

Abstract

This project consists of the development of a 900cm model rocket powered by a solid rocket booster. The rocket has an automatic parachute deployment system unit controlled by an STM32F411 microcontroller. This microcontroller is programmed with Micropython and logs data from multiple sensors onto a microSD card. It's also connected to a computer using a relatively powerful UART protocol antenna, allowing it to send coordinates and altitude (among others) in real-time. In the documents of this project, there is information and documentation that has been used to make a functional prototype as well as a bit of history on rocketry origins. Among the developed things are code for the microcontroller, electrical schematics, 3D models and its schematics, simulations and a functional prototype.

Índex.

Resum III

Resumen.....	III
Abstract	III
1. Índex de figures.....	IX
2. Índex de taules.....	XI
3. Glossari de termes.....	XIII
4. Objectius.....	1
4.1 Propòsit.....	1
4.2 Finalitat.....	1
4.3 Objecte.....	1
4.4 Abast.....	2
5. Revisió d'antecedents i necessitats d'informació.....	1
5.1 Historia.....	1
5.1.1 Inicis dels coets.....	1
5.1.2 Coets moderns.....	1
5.2 Normatives i lloc de llençament.....	2
5.3 Elements i estructura generals d'un coet HPR.....	5
5.4 Conceptes Físics.....	6
5.4.1 Centre de gravetat.....	6
5.4.2 Centre de pressió.....	6
5.4.3 Angle d'atac.....	7
5.4.4 Marge Estàtic.....	7
5.5 Procediment del vol.....	8
5.5.1 Espera.....	8
5.5.2 Enlairament.....	8
5.5.3 Vol.....	10
5.5.4 Àpside (Ap).....	10
5.5.5 Descens.....	10
5.6 Principals empreses del mercat.....	11
5.6.1 Proveïdors a Europa.....	11

5.6.2	Fabricants.....	11
5.6.3	Exemples de models similars.....	11
6.	Anàlisi de viabilitats tècniques del projecte.....	15
6.1	Viabilitat tècnica estructural.....	15
6.1.1	El con.....	15
6.1.2	Cos del coet.....	18
6.1.3	El motor.....	19
6.1.4	Les aletes.....	20
6.1.5	El paracaigudes.....	21
6.2	Viabilitat tècnica electrònica.....	22
6.2.1	Microcontrolador STM32F411.....	22
6.2.2	Altura i pressió atmosfèrica.....	23
6.2.3	Acceleració i orientació.....	23
6.2.4	El mòdul GY-91.....	24
6.2.5	Localització i telemetria.....	25
7.	Procediment de disseny final del coet.....	29
7.1	Determinació del diàmetre.....	29
7.2	Alliberament del sistema de recuperació.....	29
7.3	Disseny final.....	30
7.4	Simulacions de vol mitjançant OpenRocket.....	33
7.5	Modelització 3D del coet.....	36
7.5.1	Model 3D del con.....	36
7.5.2	Model 3D de l'aleta.....	37
7.5.3	Model 3D dels retenidors per aleta.....	38
7.5.4	Model 3D de la badia electrònica.....	39
7.5.5	Model 3D del pistó.....	40
7.5.6	Assemblatge 3D final.....	41
7.5.7	Simulacions de túnel de vent amb el model 3D.....	43
8.	Programació i electrònica.....	45
8.1	L'entorn de treball Micropython.....	45
8.2	Instal·lació de Micropython.....	46

8.3	El microcontrolador en detall (WeAct-STM32F411).	49
8.3.1	Protocols de comunicació disponibles.	50
8.3.2	Protocol USART.	50
8.3.3	Protocol I2C.	51
8.3.4	Protocol SPI.	52
8.3.5	Monitor Sèrie REPL.....	53
8.4	Connexió i configuració de les antenes HC-12 i 3DR.....	55
8.5	Connexió.....	59
8.6	El software d'obtenció de dades.....	60
8.6.1	Comunicació amb el GY-91.	60
8.6.2	Comunicació amb GY-GPS6MV2.....	61
8.6.3	Comunicació amb l'adaptador micro-SD.	61
8.6.4	Funcionament bàsic del programa.	62
9.	Especificacions tècniques.....	67
9.1	Especificacions Físiques Generals.....	67
9.2	Especificacions Electròniques.	69
10.	Anàlisi de viabilitat mediambiental.....	71
11.	Planificació i tasques del projecte.	73
12.	Proves de validació.....	77
12.1	Presa de mesures en estàtic.....	77
12.2	Prova d'ejecció del sistema de recuperació.....	78
12.3	Aproximació de mesura de velocitat terminal.....	79
12.4	Abast de l'antena amb obstacles.....	80
12.5	Abast de l'antena sense obstacles.....	81
13.	Conclusions finals, entrebancs i futures línies de treball.	83
13.1	Conclusió i entrebancs.....	83
13.2	Futures línies de treball.....	86
14.	Referències.	87

1. Índex de figures.

Il·lustració 5-1 Aerocinca vist des del cel [Font: Google Earth]	3
Il·lustració 5-2 Coet model [Font: Elaboració pròpia].....	5
Il·lustració 5-3 CG [Font: Elaboració pròpia].....	6
Il·lustració 5-4 CP [Font: Elaboració pròpia]	6
Il·lustració 5-5 Angle d'ata [Font: Elaboració pròpia]	7
Il·lustració 5-6 Marge Estàtic [Font: Elaboració pròpia].....	7
Il·lustració 5-7 Relació Impuls-Temps [Font: NASA]	9
Il·lustració 5-8 1/4 Patriot: [Font: Andrew D. Waddell].....	11
Il·lustració 5-9 Andromeda [Font: Andrew D.Waddell].....	12
Il·lustració 5-10 Torrent [Font: martymonsta].....	13
Il·lustració 6-1 Eficiència segons velocitat [Font: The descriptive geometry of nose cones] .	16
Il·lustració 6-2 Von Karman [Font: Wikipedia]	16
Il·lustració 6-3 Potència $\frac{1}{2}$ [Font: Wikipedia]	16
Il·lustració 6-4 Von Kerman [Font: Elaboració pròpia].....	17
Il·lustració 6-5 Aleta trapezoidal Escombrada [Font: Elaboració pròpia]	20
Il·lustració 6-6 Diagrama de funcionalitat [Font: Web del STM32F411]	22
Il·lustració 6-7 WeAct STM32F411 [Font: Elaboració pròpia].....	22
Il·lustració 6-8 Baròmetre BMP280 [Font: Datasheet].....	23
Il·lustració 6-9 Magnetòmetre i acceleròmetre [Font: Venedor Aliexpress]	23
Il·lustració 6-10 Mòdul GY-91 [Font: Venedor Aliexpress]	24
Il·lustració 6-11 Configuració de pins GY-91 [Font: Venedor Aliexpress]	24
Il·lustració 6-12 Exemple de GPS compatible amb el microcontrolador [Font: Venedor Aliexpress]	25
Il·lustració 6-13 HC-12 [Font: Venedor Aliexpress]	27
Il·lustració 6-14 Adaptador FTDI [Font: Venedor Aliexpress]	27
Il·lustració 6-15 Antena 3DR de 433MHz [Font: Venedor Amazon]	27
Il·lustració 7-1 Sistema d'alliberament per pistó [font: Elaboració pròpia].....	30
Il·lustració 7-2 Encapsulat RMS 29/40-120 [Font: SierraFox Hobbies]	30
Il·lustració 7-3 Disseny Inicial [Font: Elaboració pròpia]	31
Il·lustració 7-4 Disseny final [Font: Elaboració pròpia]	31
Il·lustració 7-5 Distribució de les aletes [Font: Elaboració pròpia].....	31
Il·lustració 7-6 Proposta de Disseny 3D [Font: Elaboració pròpia].....	32
Il·lustració 7-7 Altitud i velocitat [Font: Elaboració pròpia]	33
Il·lustració 7-8 CP, CG i marge estàtic [Font: Elaboració pròpia].....	34
Il·lustració 7-9 Pressió atmosfèrica i altura [Font: Elaboració pròpia].....	34
Il·lustració 7-10 Seguiment terrestre [Font: Elaboració pròpia]	35
Il·lustració 7-11 Model 3D Von Karman [Font: Elaboració pròpia]	36
Il·lustració 7-12 Secció 3D Von Kaman [Font: Elaboració pròpia]	36
Il·lustració 7-13 Model 3D de l'aleta [Font: Elaboració pròpia].....	37
Il·lustració 7-14 Retenidors d'aleta [Font: Elaboració pròpia].....	38
Il·lustració 7-15 Badia electrònica [Font: Elaboració pròpia]	39
Il·lustració 7-16 Base Pistó [Font: Elaboració pròpia].....	40
Il·lustració 7-17 Pistó [Font: Elaboració pròpia]	40
Il·lustració 7-18 Assemblatge 3D Final [Font: Elaboració pròpia].....	41

Il·lustració 7-19 Assemblatge 3D estructural (secció) [Font: Elaboració pròpia]	41
Il·lustració 7-20 Model 3D part posterior [Font: Elaboració pròpia].....	41
Il·lustració 7-21 Assemblatge real	42
Il·lustració 7-22 Simulacions de vorticitat [Font: Elaboració pròpia]	43
Il·lustració 8-1 Plataforma STM32 [Font: GitHub WeActTC].....	49
Il·lustració 8-2 USART [font: circuitbasics.com].....	50
Il·lustració 8-3 Connexions I2C [Font: circuitbasics.com].....	51
Il·lustració 8-4 Connexió SPI [Font: circuitbasics.com].....	52
Il·lustració 8-5 picocom [Font: Elaboració pròpia].....	54
Il·lustració 8-6 Connexió de configuració HC-12 [Font: Elaboració pròpia].....	55
Il·lustració 8-7 Connexió d'ús HC-12 i 3DR [Font: Elaboració pròpia].....	55
Il·lustració 8-8 HC-12 detectat [Font: Elaboració pròpia].....	56
Il·lustració 8-9 Configuració HC-12 [Font: Elaboració pròpia]	56
Il·lustració 8-10 Check Configuration HC-12 [Font: Elaboració pròpia].....	56
Il·lustració 8-11 Connexió de tots els components [Font: Elaboració pròpia]	59
Il·lustració 8-12 Vectors originals MPU9250 [Font: Elaboració pròpia]	60
Il·lustració 8-13 Diagrama de blocs de la funció auto() [Font: Elaboració pròpia].....	64
Il·lustració 8-14 Diagrama de blocs de la funció test() [Font: Elaboració pròpia]	65
Il·lustració 8-15 resposta d'auto() sense GPS [Font: Elaboració pròpia].....	66
Il·lustració 8-16 Resposta d'auto() funcionant [Font: Elaboració pròpia].....	66
Il·lustració 9-1 Disseny final ESP TEC [Font: Elaboració pròpia].....	67
Il·lustració 11-1 Diagrama de gannt part superior [Font: Elaboració pròpia].....	75
Il·lustració 11-2 Diagrama de gannt part inferior [Font: Elaboració pròpia].....	76
Il·lustració 12-1 Ejecció [Font: Elaboració pròpia]	78
Il·lustració 12-2 Abast de l'antena amb obstacles [Font: Elaboració pròpia]	80
Il·lustració 12-3 Abast de l'antena sense obstacles [Font: Elaboració pròpia].....	81
Il·lustració 13-1 Gerber 1 [Font: Elaboració pròpia]	85
Il·lustració 13-2 Gerber 2 [Font: Elaboració pròpia]	85
Il·lustració 13-3 Gerber 3 [Font: Elaboració pròpia]	85

2. Índex de taules.

Taula 5-1 Estructura d'un coet HPR.....	5
Taula 5-2 Patriot.....	11
Taula 5-3 Andromeda.....	12
Taula 5-4 Torrent	13
Taula 6-1 Velocitat Terminal	21
Taula 9-1 Especificacions Tècniques	67
Taula 9-2 Desglossat de peces	68
Taula 10-1 Accions impactants	71
Taula 10-2 Factors ambientals impactats	71
Taula 11-1 Activitats Electrònica.....	73
Taula 11-2 Activitats de software i programacio	73
Taula 11-3 Activitats Mecànica	74
Taula 11-4 Temps d'espera de comandes	74
Taula 12-1 Variació de les mesures	77
Taula 12-2 Velocitat Terminal	79

3. Glossari de termes.

Ap: Àpside

BAI: Benefici Abans d'Impostos

CG: Centre de Gravetat

CP: Centre de Pressió

CST: Codi de **seguretat** Tripoli per a HPRs

HPR: Coet d'alta potència

ICB: Índex Cost Benefici

ICBM: Míssil Balístic Intercontinental

IVA: Impost sobre el valor afegit

L1/L2/L3: Categoria de HPR de primer/segon/tercer nivell

RF: Radio freqüència

VAN: Valor Actual Net

FTDI: Future Technology Devices International (Nom alternatiu per al convertidor USB-TTL)

USART: Universal synchronous/asynchronous receiver-transmitter

SPI: Serial Peripheral Interface

RPA: Remotely Piloted Aircraft

NOTAM: Notice To Airmen

p.r.a: Potència Radiada Aparent

RTC: Real-Time Clock

4. Objectius.

En una època de grans avenços en l'exploració espacial, l'interès popular ha anat disminuint considerablement des de la carrera que va portar la humanitat a la lluna. Tot i això, empreses com SpaceX, han arribat als ulls de tothom amb campanyes publicitàries com enviar un cotxe a l'espai. Per fer-ho possible, s'utilitzen unes màquines anomenades coets. Aquestes solen tenir forma de tub allargat i són conegudes per les seves grans dimensions; tanmateix, tot i que la mida sol indicar la distància màxima que pot volar, no tots els coets són tan grans. Ignorant els pirotècnics, trobem coets de molts tipus: Models de coet (per a Hobby), Ultrasònics, Intercontinentals, Coets per a vols (sub)-orbitals, Coets per arribar a l'espai profund, etc.

4.1 Propòsit.

Dissenyar i construir un model de coet comercialitzable en forma de kit, que sigui capaç de ser autopropulsat i obtenir dades a l'aire. A més, el coet haurà de ser capaç d'aterrar de forma segura i de ser reutilitzable.

4.2 Finalitat.

Aconseguir una eina amb la finalitat d'ajudar en l'enteniment de la física aeroespacial i una guia per a construir un coet igual.

4.3 Objecte.

Obtenir un coet funcional amb les especificacions establertes que sigui capaç de fer una demostració en un espai obert i la memòria del projecte.

4.4 Abast.

El principal objectiu d'aquest projecte consisteix a desenvolupar un prototip de coet funcional que serveixi per obtenir una certificació L1 i que disposi d'un microcontrolador que permeti obtenir dades de diferents sensors.

Per al disseny del coet, s'ha estudiat quines característiques ha de tenir cada part i com l'hi afecta cada tipus de modificació. Els materials de construcció són, per al cos del coet, un tub cilíndric fet de kraft fenòlic, les aletes seran de fusta de balsa i tallades mitjançant una talladora làser. El con de cilindre tindrà forma Von Karman.

Estructuralment, s'ha calculat el CG i CP teòrics fent servir el software Open Rocket. També s'ha generat una simulació aerodinàmica de vorticitat a partir d'un model 3D del coet realitzat en SolidWorks. S'ha calculat l'Ap amb diferents motors disponibles al mercat i s'ha seleccionat el que ha donat millors resultats. Utilitzant aquestes dades i el pes individual de cada part, s'ha optimitzat el coet fins a obtenir el disseny final amb les millors prestacions possibles (Altura i estabilitat).

Quant a aspectes electrònics, s'ha creat un programa un microcontrolador que obté dades d'altura, velocitat, acceleració, pressió atmosfèrica, orientació i localització. Aquestes dades s'emmagatzemen internament en una targeta SD i, paral·lelament, són enviades a l'ordinador. Les dades GPS obtingudes serveixen per a trobar el coet un cop a terra, també es poden fer servir per a dibuixar la trajectòria del coet en Google Earth o algun software de mapatge.

El model s'ha de poder vendre en el mercat com un kit de modelisme espacial, és a dir, qualsevol persona ha de poder muntar un coet utilitzant les parts proporcionades. Els plànols formen part del projecte però l'elaboració d'un manual d'usuari i muntatge no. També s'ha calculat el preu de venda al públic i s'ha realitzat un estudi de mercat

5. Revisió d'antecedents i necessitats d'informació

5.1 Historia.

5.1.1 Inicis dels coets.

(1) Si es revisa la història dels coets, es descobreix que els primers es van utilitzar a la Xina i funcionaven amb pólvora. Aquests tipus de coets s'utilitzaven a cerimònies i són el precursor dels actuals focs artificials. Amb el temps però, van obtenir un ús militar i es van estendre cap a Europa. Aquest antics coets tenien la característica de desviar-se molt i ser poc precisos; per a solucionar aquest problema es van començar a posar pals a la cua del coet, igual que els focs artificials d'ús personal d'avui dia. No obstant això, la millor solució al problema de precisió la va proposar un inventor britànic anomenat William Hale (2) en 1844, es tracta de fer girar el coet sobre el seu eix per tal de minimitzar els efectes del desplaçament del centre de gravetat.

5.1.2 Coets moderns.

Els coets moderns van començar a utilitzar combustibles més avançats i motors molt més complexos. S'aprofita la temperatura dels gasos que escapen i s'utilitzen com si fossin un jet fent que vagin a velocitats hipersòniques. Desafortunadament però, la majoria d'aquests avenços s'han obtingut amb fins bèl·lics. Un exemple és el míssil Alemany V-2 utilitzat a la segona guerra mundial i que, en acabar la guerra, va evolucionar a un coet d'exploració de condicions atmosfèriques a grans altures.

Durant la guerra freda els dissenys del coet V-2 van ser copiats pels soviètics amb el nom de R-1, aquest míssil va anar evolucionant fins a convertir-se en un míssil ICBM anomenat R-7. El 4 d'octubre de 1957 una versió adaptada del R-7 va posar en òrbita el satèl·lit sputnik-1, aquest assoliment va donar inici a la famosa carrera espacial i a les missions Apollo que van posar la humanitat a la lluna el 20 de juliol de 1969 amb el coet Saturn V.

Es veu doncs que al llarg de la història els coets han tingut un paper tant científic com bèl·lic dependent de cada país i la situació en la qual es trobava.

5.2 Normatives i lloc de llençament.

En l'actualitat, els coets es classifiquen en dues categories segons el seu impuls i mida, coets amateurs i coets d'alta potència (HPR). Aquests últims estan classificats per nivells 1, 2 i 3 segons la seva perillositat. Es necessiten permisos especials i un previ examen per a poder despagar-los. A més, per a poder obtenir el permís per a llençar un coet de nivell 2, primer s'ha d'haver aconseguit llençar i recuperar amb èxit un coet de nivell 1. Per tant, l'objectiu serà construir un HPR capaç de superar un examen de nivell 1 (L1), que compleixi tant amb el codi de seguretat de l'associació internacional Tripoli per a HPRs (3) com amb totes les normes d'aviació civil espanyoles, l'agència de seguretat aèria espanyola i totes les lleis, estatuts locals, etc. Així doncs, les normatives que regeixen aquest projecte són:

- Reial Decret 1036/2017 {15/Desembre/2017}, publicat al BOE amb numero 316 {29/Desembre/2017}
- Reial Decret 1066/2001 {28/Novembre/2001}, publicat al BOE amb referència BOE-A-2001-18256.
- Ordre ETU/1033/2017 {Actualització: 26/Abril/2018}, publicat al BOE.
- Codi de seguretat de l'associació internacional Tripoli per HPRs (3) {Abril/2010}
- Adaptació de les normes Tripoli per la Real Federació Aeronàutica Espanyola (RFAE)
- Normes dictades per la comissió Tècnica Nacional d'Aeromodelisme (CTNA)

A més, el coet complirà amb les característiques establertes per el model del projecte “The theoretical prediction of the center of pressure” (3^a pagina) de Jim S. Barrowman i Judith A. Barrowman (4) publicat l'agost del 1966 per tal de poder fer les següents assumpcions:

1. No hi ha turbulències ni friccions sobre el coet
2. La punta del con del coet serà esmolada
3. Les aletes del coet no tenen cantonades i són planes
4. L'angle d'atac és gairebé 0
5. L'avenç és subsònic
6. El coet es considera un sòlid rígid
7. El coet és axisimètric

Aquestes assumpcions són útils de cara a les simulacions.

Les normatives mencionades, a excepció de l'Ordre ETU/1033/2017, són codis de seguretat o lleis relacionades amb el vol de RPAs (drons PILOTATS remotament) i l'ús de radiofreqüències en general. Possiblement el reglament més limitant de cara a aquests tipus de models és el document "Reglamento RFAE sobre el Modelismo Espacial" (5). Aquest reglament deixa clar que, només si es tracta d'una competició, els models coets es podran enlairar en terrenys designats a organitzacions federades (RFAE) amb llicència vàlida al territori. Igualment però, abans d'una competició, l'organització en qüestió haurà de sol·licitar un NOTAM a l'Agència Estatal de Seguretat Aèria. Quant als practicants, aquest hauran de estar federats a les organitzacions.

No obstant, quant a ús amateur els models coets es troben en una situació d'alegalitat, es a dir, no son prohibits ni regulats. Això significa que tècnicament cada persona s'ha de fer càrrec de les seves accions i serà responsable de tots els danys causats per l'ús no responsable d'aquesta llibertat.

En el cas d'Espanya i en concret Catalunya, l'organització al càrrec es SpainRocketry (6), fa quedades mensuals generalment en dissabte i disposen d'accés a les instal·lacions d'un club aeri anomenat Aerocinca situat a Alcolea de Cinca, Osca amb coordenades:

41° 44' 06,18" N; 0° 06' 29,66" E [**Latitud:** 41.73505 | **Longitud:** 0.108239]



Il·lustració 5-1 Aerocinca vist des del cel [Font: Google Earth]

Quant a l'ús de radiofreqüència per a la transmissió de dades, cada país disposa de les seves normes. En el cas concret d'Espanya, les normes són força semblants a les estàndard de la Unió Europea. Generalment però, per aquest tipus d'aplicacions, es fan servir les anomenades “bandes d'ús comú”, que no són més que bandes de l'espectre de ràdio d'ús lliure i sense necessitat de llicència.

Per a les especificacions requerides de telemetria doncs, l'ús de la banda de 430 a 440 MHz és el més adequat. A dia de 22 de maig del 2020 la norma en vigor és l'ETU/1033/2017, que diu el següent per aquest rang de l'espectre:

Banda de 430 a 440 MHz:

Esta banda está atribuida a los servicios de aficionados y de radiolocalización, por lo que en estas frecuencias no se autorizan usos de otros servicios, con la salvedad de los indicados en la nota UN-30.

Dentro de la banda de aplicaciones ICM de 433,050 a 434,790 MHz, se autorizan el uso de dispositivos no específicos de baja potencia de conformidad con lo establecido en la nota UN-30.

La norma a més fa referència a la nota UN-30:

UN-30:

En la banda 433,050-434,790 MHz (Frecuencia central 433,920 MHz), de conformidad con la Decisión de Ejecución (UE) 2017/1483 de la Comisión por la que se modifica la Decisión 2006/771/CE, sobre la armonización del espectro radioeléctrico para su uso por dispositivos de corto alcance, así como la Recomendación 70-03 (anexo 1) de la CEPT, se permite con la consideración de uso común, la utilización de dispositivos no específicos de corto alcance (SRD), bajo las siguientes características:

Banda de frecuencias	Potencia	Canalización	Notas
433,050-434,790 MHz	1 mW p.r.a. -13 dBm/10 kHz	No se define	Se excluyen aplicaciones de audio y vídeo. Se permiten aplicaciones de voz con técnicas de mitigación avanzadas.
433,050-434,040 MHz	10 mW p.r.a.	No se define	Ciclo de trabajo ≤10% Se excluyen aplicaciones de audio y vídeo.
434,040-434,790 MHz	10 mW p.r.a.	No se define	Ciclo de trabajo ≤10% Se permiten aplicaciones de voz con técnicas de mitigación avanzadas.
434,040-434,790 MHz	10 mW p.r.a.	25 kHz	Se excluyen aplicaciones de audio y vídeo. Se permiten aplicaciones de voz con técnicas de mitigación avanzadas.

A las utilizaciones descritas en esta nota les es de aplicación el contenido de la nota UN-32 relativa a aplicaciones industriales, científicas y médicas (ICM).

Las instalaciones de este tipo deben de aceptar la interferencia perjudicial que pudiera resultar de aplicaciones ICM u otros usos de radiocomunicaciones en estas frecuencias o en bandas adyacentes.

D'aquesta norma doncs es pot extreure que per a la funció requerida de transmissió bidireccional de telemetria, serà necessària una antena que treballi amb una p.r.a de màxim 1mW i un duty cycle de 10KHz amb una freqüència de treball entre 433.050KHz i 434.790KHz.

5.3 Elements i estructura generals d'un coet HPR.

Utilitzant de referència un coet HPR L2 o L3 (Il·lustració 5-2) es pot veure com un coet HPR està format per entre cinc o sis parts.

1 Con

Es punxegut i aporta aerodinàmica. Es pot desacoblar de la secció principal deixant sortir el paracaigudes agafat a aquest últim.

2 Secció Principal

Conté el paracaigudes principal, s'allibera quan desacoblem el con. Es tracta d'un gran paracaigudes de baixa altitud.

3 Badia Electrònica

Conté tots els components electrònics per al funcionament del coet. També s'hi pot afegir una càmera.

4 Secció drogue

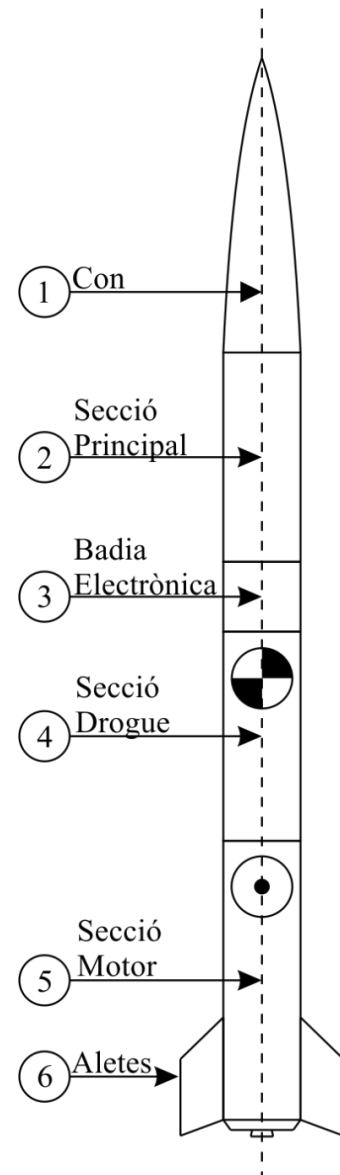
Aquí es conté el paracaigudes opcional, es tracta d'un petit paracaigudes de gran altitud i no se sol utilitzar en HPRs L1 ja que no arriben tan alt.

5 Secció motor

S'hi posa la tovera, el motor, el combustible i sistema contra incendis, en el nostre cas com es tracta de combustible sòlid son cartutxos de combustible.

6 Aletes

Mantenen l'estabilitat del coet, també li aporten la rotació per estabilitzar-lo. S'hi solen posar 3 o 4.

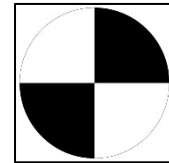


Il·lustració 5-2 Coet model [Font: Elaboració pròpia]

5.4 Conceptes Físics.

5.4.1 Centre de gravetat.

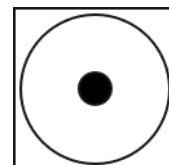
(7) Representat pel dibuix de la Il·lustració 5-3, el centre de gravetat o CG és un punt inherent a qualsevol objecte que disposi de massa. Representa la ubicació mitjana del pes d'un objecte. Es fa servir per descriure la translació i rotació d'un objecte, ja que aquestes succeeixen sobre el centre de masses. En altres paraules, si un objecte gira a l'espai sobre si mateix, aquest ho farà sobre el seu centre de gravetat. A causa de la crema del combustible durant el vol del coet, aquest punt anirà canviant. S'ha de tenir en compte doncs el CG durant l'engegada ($t=0$) i durant el seu punt més elevat conegut com a àpside (A_p).



Il·lustració 5-3 CG [Font:
Elaboració pròpia]

5.4.2 Centre de pressió.

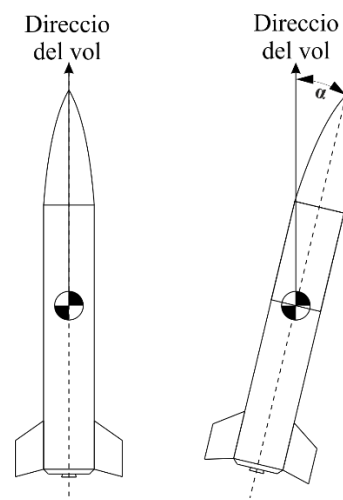
(8) Quan un objecte es desplaça a través d'un fluid (que és l'aire en el nostre cas), s'està creant un desplaçament del mateix fluid. A causa d'això aquest exerceix unes forces sobre l'objecte que anomenem pressions. El centre de pressions o CP representat pel dibuix de la Il·lustració 5-4, és el punt mitjà en el qual es reuneixen totes les pressions. A diferència del CG, el CP varia de posició depenent de l'orientació de l'objecte dins del fluid, tanmateix, ja que ens interessa un ascens vertical, considerarem el CP com un punt estàtic. El CP s'utilitza juntament amb el CG per assegurar l'estabilitat del coet durant el seu ascens.



Il·lustració 5-4 CP [Font:
Elaboració pròpia]

5.4.3 Angle d'atac.

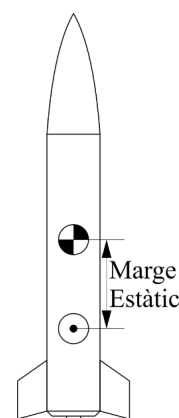
Representat per la lletra grega α , l'angle d'atac és l'angle que es forma entre l'eix longitudinal del coet i la direcció en la qual vola. No s'ha de confondre però amb l'angle entre l'eix longitudinal del coet i l'eix perpendicular a la superfície terrestre, tot i que poden ser el mateix com és el cas en la Il·lustració 5-5. És important notar que un llançament es considera perillós quan l'angle d'atac varia en 20° , ja que es fa evident que hi ha hagut algun problema durant la seva construcció. Per altra banda, si ha sigut per causes externes com el vent, es torna molt difícil de recuperar la direcció.



Il·lustració 5-5 Angle d'ata [Font: Elaboració pròpia]

5.4.4 Marge Estàtic.

Durant el vol, és important que el coet sigui capaç de mantenir la seva orientació. Aquest control es pot obtenir de forma passiva assegurant un marge estàtic positiu, o de forma activa utilitzant estabilitzadors “gimbal” o suports auxiliars RCS. En el cas passiu, el marge estàtic representa la distància entre el CP i el CG. Si el CP està per sota del CG, considerarem una estabilitat estàtica positiva, en cas contrari aquesta serà negativa. (9) En el cas d'un coet, pot passar que el vent o una imperfecció en la seva construcció l'hi facin variar el seu angle d'atac, quan això passa, una força lateral generada per les aletes situada al CP provocarà una rotació.



Il·lustració 5-6 Marge Estàtic [Font: Elaboració pròpia]

Si l'estabilitat estàtica és positiva, aquesta força contrarestarà la variació de l'angle d'atac i retornarà naturalment a la posició inicial, no obstant això, si l'estabilitat fos negativa, la rotació seria a favor de l'angle d'atac i desestabilitzaria el coet. Per tal de baixar el CP es poden utilitzar aletes més grans, una altra opció és augmentar el CG fent que el con pesi més. A priori pot semblar que es busca un CP com més lluny del CG millor, tanmateix, com més gran la distància més difícil és canviar la trajectòria amb superfícies de control. No és

problema però si es fa servir un coet 100% passiu, en aquest cas el marge estàtic ha de ser com a mínim el diàmetre més gran del cos del coet, sense tenir en compte les aletes.

5.5 Procediment del vol.

5.5.1 Espera.

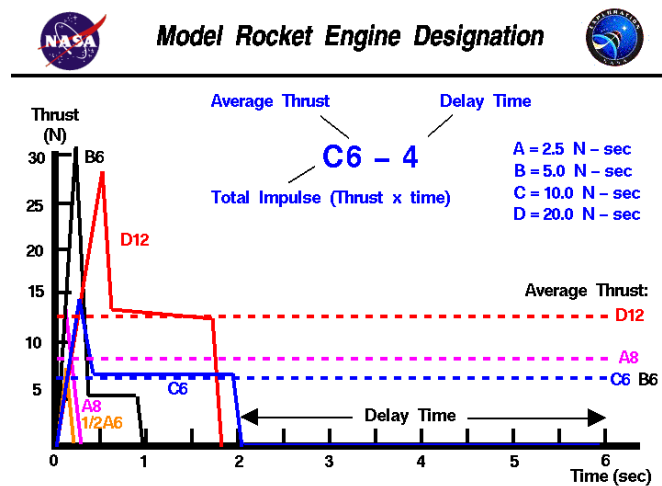
Durant els instants previs a l'enlairament es posa i s'assegura el motor, un cop fet es col·loca el coet en posició sobre una plataforma totalment plana i amb una barra guia que apunti directament al cel. Si tot està llest i en ordre es pot procedir a col·locar un encenedor electrònic sota el motor.

El coet ara es pot considerar un gran perill, per a coets d'aquest tipus, segons les normes Tripoli, no hi pot haver ningú a menys de 30m. A més, l'accionament de l'encenedor s'haurà de fer remotament i amb un botó que retorni a la posició de repòs si no està polsat i que necessiti clau per a poder funcionar. Es recomana també disposar d'una pantalla de protecció.

5.5.2 Enlairament.

Un cop s'hagi pressionat el botó d'engegada, el coet hauria d'enlairar-se ràpidament. En cas contrari ningú s'hi pot apropar com a mínim en dos minuts. Si tot va bé però, el coet haurà sortit disparat cap al cel. Considerem enlairament doncs, el període de temps en el que el motor està funcionant, d'acord amb la NASA (10), com es veu a la Il·lustració 5-7, es tracta d'un interval d'entre 0,2 a 2 segons.

Durant aquest període de temps, el coet patirà una gran acceleració que posarà a prova la seva rigidesa. És important però, que en els primers instants el coet estigui agafat a una guia que asseguri un ascens vertical, ja que durant l'engegada és possible que el combustible no es consumeixi homogèniament.



Il·lustració 5-7 Relació Impuls-Temps [Font: NASA]

5.5.3 Vol.

Es considera vol el moment en el qual el coet està ascendint amb el motor apagat però amb inèrcia. Haurà de mantenir el seu rumb i aguantar possibles vents i la resistència de l'aire però no hauria d'haver-hi problema sempre que les condicions no siguin extremes i s'hagi escollit una mida adequada per l'aleta. Eventualment la velocitat ascendent del coet serà 0, això marcarà l'Ap, que és el punt en què el coet haurà d'obrir el paracaigudes. Generalment, es calcula el temps entre la parada del motor i l'arribada a l'Ap per a posar un retard i obrir el paracaigudes, malgrat això, això s'ha de poder fer electrònicament mitjançant sensors i un microcontrolador. Formarà part del projecte desenvolupar alguna solució a aquest problema.

5.5.4 Àpside (Ap).

Es considera l'Ap com l'instant en el que el coet es troba en el punt més elevat de la seva òrbita.

Com l'òrbita del coet no surt de l'atmosfera, aquest es el punt en el que la velocitat vertical es 0 però el coet no toca el terra. No funciona de la mateixa manera però per les òrbites espacials estables, ja que la velocitat vertical es nul·la en aquests casos.

5.5.5 Descens.

El descens del coet comença un cop s'hagi obert el paracaigudes. En principi, el coet descendirà a una velocitat acceptable i aterrarà conservant totes les parts. En alguns coets L2 o L3 però, a causa de l'alçada a la qual poden arribar, s'utilitza un paracaigudes drogue. El funcionament és simple, un paracaigudes normal té uns requeriments de velocitat i pressió atmosfèrica, és possible que a l'Ap sigui massa elevat per a un paracaigudes normal o que la velocitat terminal sigui massa alta. Per aquesta raó els paracaigudes drogue frenen el descens fins que un paracaigudes normal es pot obrir. Tanmateix, per un L1 aquestes condicions no s'arriben a complir mai. Un cop a terra el coet haurà de portar algun sistema de localització per a poder trobar-lo fàcilment.

5.6 Principals empreses del mercat.

Al mercat no hi ha gaires empreses dedicades a la construcció de kits de coet per certificació L1, a més, com fora dels EEUU i el Sud-Est asiàtic no és una pràctica tan popular, la majoria de les empreses que s'hi dediquen són Americanes. Per a comprar subministres o kits a Europa s'ha de recórrer a venedors que importen aquests productes, aquest procés augmenta innecessàriament els costos, ja que importar productes dels EEUU surt molt car.

5.6.1 Proveïdors a Europa.

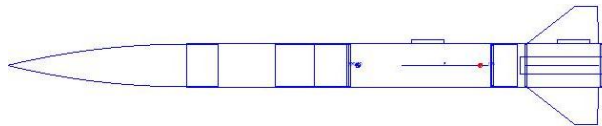
- Sierrafox hobbies (Itàlia)
- EuroSpaceTechnology (Països Baixos)
- Modelrockets (Regne Unit)

5.6.2 Fabricants.

- Public Missiles Limited (EEUU)
- Madcow Rocketry (EEUU)
- Wildman Rocketry (EEUU)
- Aerotech (EEUU)
- Estes (EEUU)
- Fusion Rocket (EEUU)

5.6.3 Exemples de models similars.

A. 1/4 Patriot

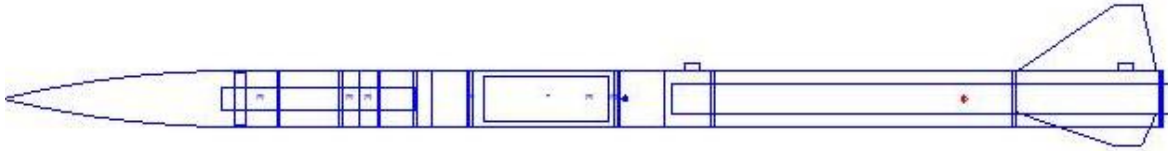


Il·lustració 5-8 1/4 Patriot: [Font: Andrew D. Waddell]

Fabricant:	Public Missiles.
Mides de motor:	29mm (amb adaptador). 38mm.
Impuls del motor:	G,H,I i alguns J.
Llargada:	1422,4 mm.
Diàmetre:	51,41 mm.
Materials:	Paper, Balsa.
Pes Buit:	1,42 kg.

Taula 5-2 Patriot

B. Andromeda



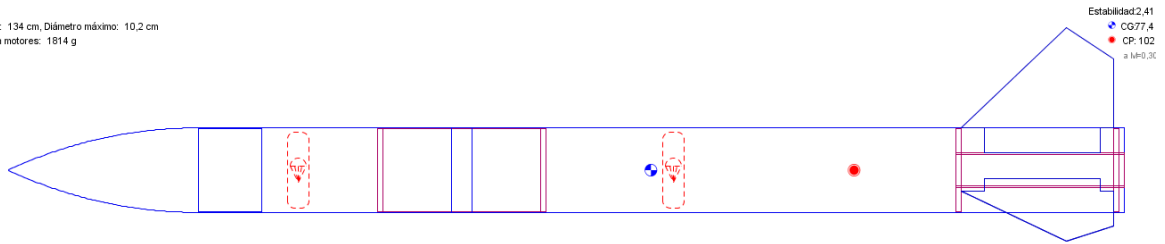
Il·lustració 5-9 Andromeda [Font: Andrew D.Waddell]

Fabricant:	Public Missiles.
Mides de motor:	29,38mm (amb adaptador). 54 mm.
Impuls del motor:	G,H,I,J,K.
Llargada:	1638,3 mm.
Diàmetre:	99,06 mm.
Materials	Paper Fenolic, Resines, Fibra de vidre, Plastic.
Pes Buit:	1,93 kg.

Taula 5-3 Andromeda

C. Torrent

Torrent
 Longitud: 134 cm, Diàmetre màxim: 10,2 cm
 Massa sin motores: 1814 g



Il·lustració 5-10 Torrent [Font: martymonsta]

Fabricant:	Madcow.
Mides de motor:	38 mm.
Impuls del motor:	G,H,I i alguns J.
Llargada:	1371,6 mm.
Diàmetre:	101,6 mm.
Materials	Paper, Plàstic, Fusta.
Pes Buit:	1,79 kg.

Taula 5-4 Torrent

6. Anàlisi de viabilitats tècniques del projecte.

6.1 Viabilitat tècnica estructural.

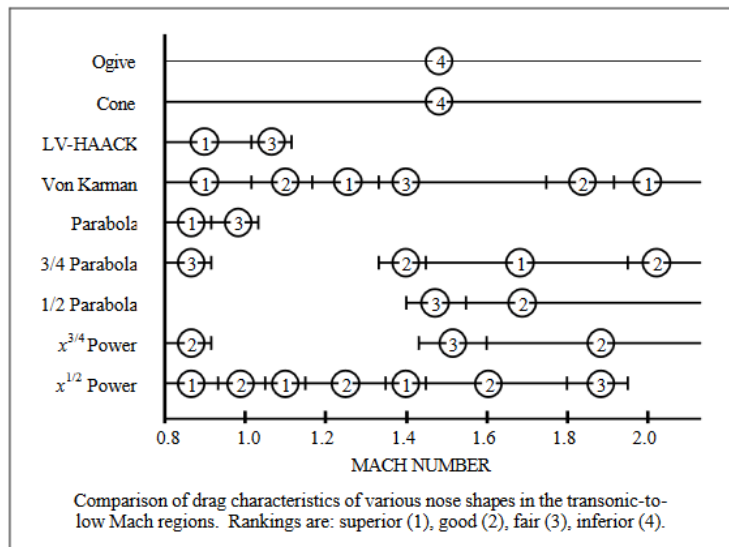
Per l'anàlisi de la viabilitat tècnica s'ha analitzat cada component de l'estructura general del coet i s'ha definit quin disseny haurà de tenir, de quins materials estarà fabricat així com la seva obtenció i possible processat. És important fer notar que és un primer anàlisi i no un disseny final, tot se subjecti a canvis.

6.1.1 El con.

El con és la peça que correspon a la part superior del coet, és l'encarregada d'obrir pas entre l'aire i ha d'estar molt ben dissenyada per tal d'evitar fregaments i ajudar a mantenir el rumb del coet. Si l'hi afegim pes, podem pujar el CG global del coet per obtenir un major marge estàtic. A més, durant l'Ap el con ha de ser capaç de desprendre's del coet (sense que es perdi), i deixar sortir el paracaigudes.

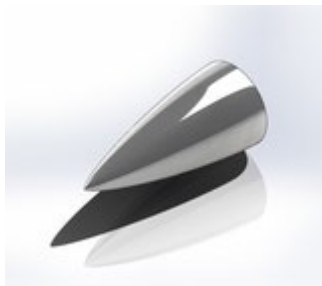
Per al seu disseny, s'ha consultat el document "The descriptive geometry of nose cones" (11) on es fa un estudi en profunditat de diferents tipus de formes i s'obté, entre altres la localització del CP i formules molt importants per a definir superfícies, volums, CG, etc.

L'estudi també mostra la Il·lustració 6-1, que valora mitjançant un sistema de puntuacions cada tipus de con amb diferents velocitats. En aquest cas, el coet no superarà Mach 1 (Velocitat del so), ja que faria malbé l'estructura, es per això que interessa enfocar-se en la secció entre 0.8 i 1.0. És veu doncs com destaquen els dissenys LV-HAACK, Von Karman, Paràbola i la Potència d' $x^{1/2}$. L'estudi però, per a coets amateurs, recomana utilitzar el Von Karman o la Potència d' $x^{1/2}$.

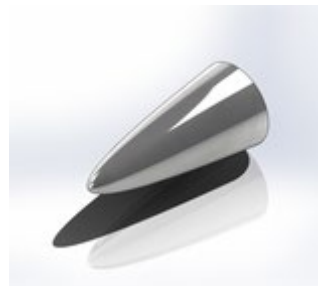


Il·lustració 6-1 Eficiència segons velocitat [Font: The descriptive geometry of nose cones]

A la pàgina “nose cone design” disponible a la Wikipedia (12), hi ha els renderitzats de Von Karman (Il·lustració 6-2) o la Potència $d'x^{1/2}$ (Il·lustració 6-3). Aparentment els dos tenen la mateixa forma a excepció de la punta, el con de Von Karman és punxegut i el con de la Potència $\frac{1}{2}$ no. Tenint això en compte, s’ha de descartar la possibilitat d’utilitzar la Potència $\frac{1}{2}$ perquè segons les característiques del coet de Barrowman especificades “**Error! Reference source not found.**esmolada”.

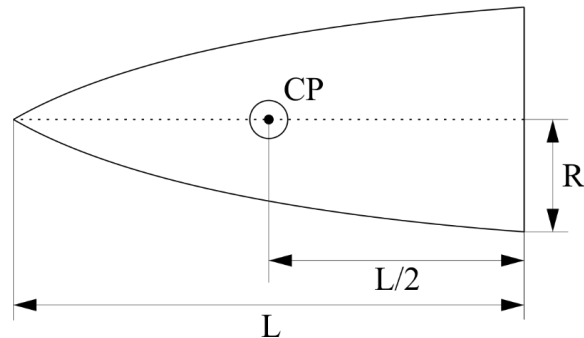


Il·lustració 6-2 Von Karman [Font: Wikipedia]



Il·lustració 6-3 Potència $\frac{1}{2}$ [Font: Wikipedia]

Així doncs, el disseny final és el de Von Karman, les característiques que el defineixen són les següents:



Il·lustració 6-4 Von Kerman [Font: Elaboració pròpia]

$$y = \frac{R}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\theta - \frac{\sin 2\theta}{2}} \quad (6.1)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2x}{L} \right) \quad (6.2)$$

En tractar-se d'un model tant difícil d'adquirir ja que ha d'estar fet a mida, el millor material serà l'ABS imprès en 3D. S'ha fet per tant un model 3D del con mitjançant Solidworks 7.5.1.

6.1.2 Cos del coet.

El cos del coet conté la secció principal, la qual es refereix a la part del coet on es guarda el paracaigudes o sistema de recuperació desitjat, a diferència del con, la seva forma exterior es exclusivament cilíndrica tot i que algunes vegades permet canvis de diàmetre mitjançant adaptadors cònics.

També hi trobem la badia electrònica, que és on s'emmagatzemen tots els circuits, sensors, bateria, convertidor de tensió i antena.

A la part inferior del coet trobem un cilindre interior, es tracta de la carcassa del motor. La reacció química d'aquest és altament exotèrmica i no es pot parar perquè és autooxidant. No hauria de ser problema però ja que la duració d'aquesta etapa és molt curta i no dona temps a cremar res.

Al cos del coet també s'hi adjunten les aletes, de les quals n'hi ha més informació més endavant.

Finalment, el cos està construït de paper fenòlic també conegut com a cartó kraft, és d'alta resistència, es pot treballar fàcilment, no és gaire difícil de trobar i el seu preu és fàcilment assumible. A més, ve tractat amb una pel·lícula de lacat fi que disminueix dràsticament la seva fricció amb l'aire.

6.1.3 El motor.

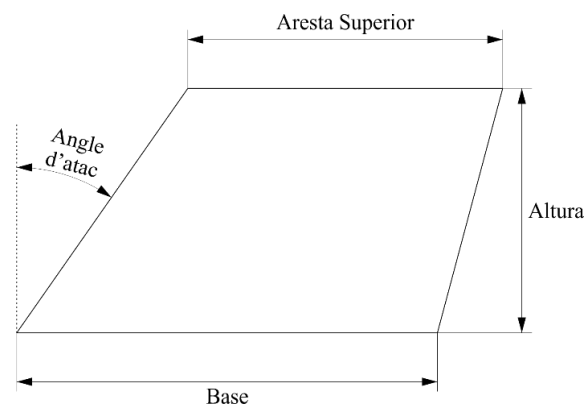
El motor és aquella part del coet dedicada a proporcionar l'impuls necessari per a desplaçar-lo. Trobem que de cara a impulsar coets s'utilitzen, essencialment, dos tipus de motors. Per un costat hi ha els complicats motors de combustible líquid els quals utilitzen dos tancs, un amb combustible i l'altre amb oxigen.

Els avantatges d'aquest tipus de motors són la capacitat de controlar l'impuls o inclús parar-lo per complet, també són els motors amb més impuls. Per altra banda, els motors de combustible sòlid són molt més simples i fiables però un cop engegats no es poden parar ni controlar, ja que utilitzen una reacció química que produeix el seu propi oxigen.

A causa de l'altíssima complexitat, el gran pes i les normes Tripoli, el coet utilitza un motor de combustible sòlid que es pot adquirir al mercat. La selecció del motor s'ha fet un cop dissenyat el coet, amb l'ajuda del document "Selecting Rocket Motors: A step-by-step procedure" El coet pot utilitzarà un motor de categoria E, F o G de 29 mm per aconseguir una compatibilitat amb els motors d'L1 H i I.

6.1.4 Les aletes.

Juntament amb el con, les aletes són un dels elements més importants quant a mantenir l'estabilitat es refereix. Hi ha de diferents formes i quantitats, el normal és tenir tres o quatre aletes situades axisimètricament a la base del coet, ja que així baixem el CP. Per escollir la forma i quantitat d'aletes, s'ha utilitzat l'estudi (13) "Effects of Different Fin Shapes on Apogee and Stability of Model Rockets", que prova diferents formes d'aleta i compara l'efecte de cada possible variable (gruix, superfície, error, etc.) sobre l'estabilitat del coet i l'Ap. També s'ha fet servir la publicació (14) "What is the best fin shape for a model rocket?" per assegurar la decisió. Aquesta última afirma que, tot i que matemàticament l'aleta amb forma el·líptica és la millor, aconseguir les condicions perfectes és tan complicat que és millor utilitzar un model més lineal. A més, a altes velocitats com les dels HPR, l'aire es comença a comprimir contra les superfícies i el model el·líptic deixa de ser eficient. Per tant, s'utilitzarà un model trapezoidal tipus "Swept" o escombrat (Il·lustració 6-5) com es fa en el cas de la majoria d'avions, ja que simplifica enormement les tasques de perfeccionament. A més, s'utilitzaran tres aletes per a reduir la resistència de l'aire.



Il·lustració 6-5 Aleta trapezoidal Escombrada [Font: Elaboració pròpia]

Les aletes s'imprimiran en 3D i estaran fetes de ABS, la seva forma s'ha obtingut després de simular i millorar amb el programa Open Rocket. Les cantonades són arrodonides per evitar turbulències segons l'estudi de Barrowman "Les aletes del coet no tenen cantonades i són planes".

6.1.5 El paracaigudes.

Quan un objecte cau a través d'una atmosfera, es veu accelerat per la gravetat del planeta però troba resistència del gas que ha desplaçat. L'objecte accelerarà fins que la resistència del gas (que augmenta amb la velocitat) sigui capaç d'igualar l'acceleració. Quan això passa s'obté una velocitat de caiguda constant que s'anomena velocitat terminal. Per a calcular-la es fa servir la fórmula (8.3).

$$V_t = \sqrt{\frac{2 * m * g}{C_a * \rho * A}} \quad (8.3)$$

Es vol reduir la V_t del coet a uns valors segurs d'entre 4,5 m/s i 3 m/s. Les variables controlables són la massa, el coeficient d'arrossegament i l'àrea resistent, no obstant, totes aquestes variables han de ser com més petites millor per afavorir l'ascens. Per aquesta raó s'utilitzen paracaigudes desplegable que canvien dràsticament el C_a i la Àrea resistent però que ho fan només quan es desitjat.

V_t	Velocitat Terminal (m/s).
m	Massa (kg).
g	Gravetat (m/s^2).
C_a	Coefficient d'arrossegament.
ρ	Densitat del gas (kg/m^3).
A	Àrea resistent (m^2).

Taula 6-1 Velocitat Terminal

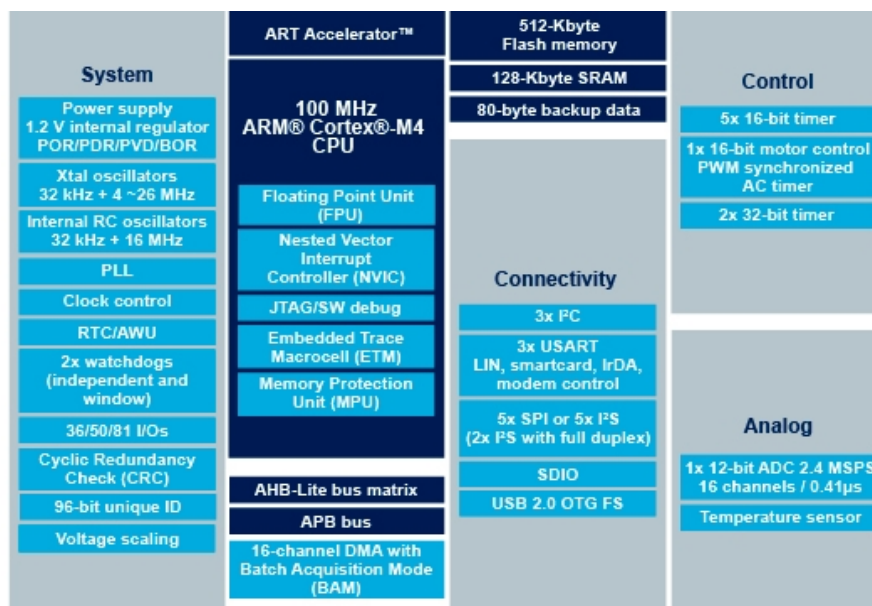
Els paracaigudes típics tenen un C_a d'aproximadament 1,75 i els coets model uns 0,75. La densitat del gas dependrà de l'alçada, tot i així com l'ascens serà de màxim 1 km i representa un 1% de la distància per arribar a l'espai, s'assumeix una densitat constant de $1.255 kg/m^3$. Fent servir una massa típica d'1,6 kg doncs, es pot calcular que serà necessària una àrea resistent mínima de $0,706 m^2$. Si es mira el mercat, es troba una gran varietat de dissenys exòtics, la majoria estan pensats per suportar una apertura a grans velocitats però perden C_a . Així doncs, per l'adquisició d'un paracaigudes, és més segur apostar per $1 m^2$ d'àrea resistent i mirar amb cura les característiques tècniques, ja que al final val més que caigui lent que no ràpid.

6.2 Viabilitat tècnica electrònica.

S'ha programat un microcontrolador STM32 per tal d'obtenir dades d'altura, velocitat, acceleració, pressió atmosfèrica, orientació i localització. També s'ha creat un PCB compacte que va a la badia electrònica.

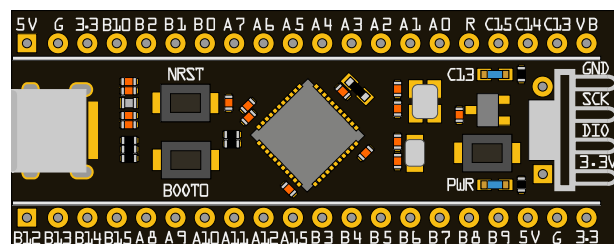
6.2.1 Microcontrolador STM32F411.

L'STM32F411 és un microcontrolador de gran resistència, capaç de treballar en ambients industrials i en un rang de temperatura entre -40°C i 125°C . Es reconegut pel seu baix consum, la disponibilitat d'unitat de punt flotant, múltiples connexions I2C, SPI i USART i la potència d'un Cortex-M4. S'utilitzarà en una placa de desenvolupament coneguda popularment com Black Pill v2. Es pot programar còmodament mitjançant MicroPython i Arduino IDE, és en general un microcontrolador que ofereix una gran funcionalitat a una mida reduïda.



Il·lustració 6-6 Diagrama de funcionalitat [Font: Web del STM32F411]

La solució final fa servir una plataforma de desenvolupament amb aquest microcontrolador. Més informació a l'apartat 8.3.



Il·lustració 6-7 WeAct STM32F411 [Font: Elaboració pròpia]

6.2.2 Altura i pressió atmosfèrica.

Per a mesurar altura es pot fer servir la pressió de l'aire mitjançant un baròmetre, com el sensor serà dins de la badia electrònica és important que la pressió de l'aire dins del coet sigui igual a l'exterior. Per aquesta raó s'han de fer uns petits orificis a la superfície de la badia.



Il·lustració 6-8 Baròmetre BMP280 [Font: Datasheet]

Durant l'ascens, com el coet és molt ràpid, si no es fessin els orificis, la pressió interior seria sempre una mica major que l'exterior (durant l'ascens). Així doncs, si es volgués fer un seguit de mesures, aquestes serien incorrectes. Fent els orificis però, es pot assumir que les mesures són correctes i es pot inclús calcular la velocitat vertical en temps real.

6.2.3 Acceleració i orientació.

Les mesures d'acceleració es poden prendre mitjançant un acceleròmetre, aquest utilitza la pressió exercida per l'acceleració sobre piezoelèctrics i la tradueix en valors numèrics que es poden llegir amb el microcontrolador. Aquests acceleròmetres generalment acompanyen a un sensor giroscopi i un magnetòmetre capaç de detectar tant l'orientació com els canvis d'angle respecte la terra.

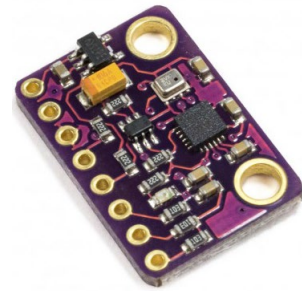


Il·lustració 6-9 Magnetòmetre i acceleròmetre [Font: Venedor Aliexpress]

Utilitzant la combinació dels tres es poden obtenir mesures d'acceleració en totes les direccions i l'orientació del sensor en tot moment. Generalment però, per mesurar velocitat no s'utilitzaria un acceleròmetre i de fet és molt més fiable l'ús de GPS. No obstant això, el GPS no pot obtenir valors de velocitat vertical fiables, per aquest motiu es calcula mitjançant la variació de l'altitud.

6.2.4 El mòdul GY-91.

La necessitat d'adquirir un baròmetre, magnetòmetre, giroscopi i acceleròmetre per separat genera la complicació d'haver de connectar i programar quatre sensors diferents perquè treballin junts. Una millor opció és l'adquisició del mòdul GY-91, es tracta d'un robust circuit que porta al mercat del 2015 i que mitjançant la connexió de 8 pins dóna accés a quatre sensors amb dos xips:



*Il·lustració 6-10 Mòdul GY-91
[Font: Venedor Aliexpress]*

L'MPU9250 creat per InvenSense és l'encarregat de gestionar l'acceleròmetre, el magnetòmetre i giroscopi. D'altra banda, el Bosch BMP280 és el sensor de pressió més recent de la marca. Obtenim doncs $9+1 = 10$ graus de llibertat per un preu que gira entorn dels 4,5 €.

Quant a programació, cada xip disposa de llibreries i datasheets propis que mostren el funcionament dels sensors i l'accés als seus registres, tanmateix, hi ha repositoris disponibles a Github que tenen venen amb les llibreries pre-instal·lades.

La connexió depèn del tipus de comunicació que es realitzi, ja que els dos xips utilitzen el mateix pin per a transmetre informació.

Si es fa servir comunicació SPI, es disposa de dos pins de selecció de xip, l'NCS per al MPU9250 i el CSB per al BMP280.

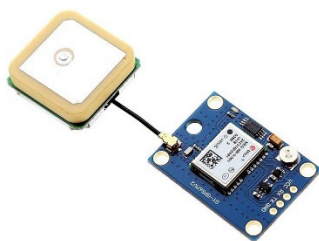
Per a connexions més avançades de bus I2C disponibles amb l'STM32, es disposa dels pins SCL i SDA.



Il·lustració 6-11 Configuració de pins GY-91 [Font: Venedor Aliexpress]

6.2.5 Localització i telemetria.

Un cop aterrat, trobar el coet no és cap tasca fàcil, plantes altes, arbres, ombres i la falta de llum són alguns dels factors que hi juguen un paper. Per fer front a aquest problema es poden utilitzar sistemes de localització actius i passius. Es defineixen els sistemes passius com aquells que mitjançant ajudes audiovisuals permeten localitzar el coet un cop s'és pròxim. Exemples d'aquest tipus d'ajudes són el color del coet, alertes lluminoses o sonores. D'altra banda els sistemes passius fan ús del microcontrolador o altres dispositius electrònics i permeten trobar el coet mitjançant transmissió de dades. Alguns d'aquests mètodes inclouen determinar l'origen de per exemple el senyal de l'antena Wi-Fi, el gran inconvenient és la dificultat i el temps necessari. Si es vol apostar per un mètode més fiable, el millor és utilitzar la localització per GPS, ja que és una tecnologia ràpida, de gran precisió i baix consum.



Il·lustració 6-12 Exemple de GPS compatible amb el microcontrolador [Font: Venedor Aliexpress]

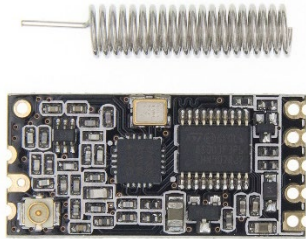
La telemetria és un altre de les tasques més importants, ja que aquestes dades de localització han d'arribar a la persona encarregada de trobar-lo. Les solucions són diverses però el factor més important és la distància. Sabent que un coet d'aquest tipus no arribarà a més d'1km d'altitud, si s'assumeix un ascens completament vertical i un vent lateral i constant de màxim 7km/h, es pot estimar una distància d'aterrament de no més de 500m. Tot i que no és gaire lluny, és suficient per a descartar tant el Wi-Fi com el Bluetooth. Una altra opció és utilitzar xarxes mòbils, l'inconvenient sent que s'ha de contractar una tarifa i depèn de la cobertura. Com a alternativa, es pot utilitzar la comunicació per ràdio freqüència (RF). Són necessàries dues antenes disponibles al mercat, una per al microcontrolador i un altre per al portàtil que s'utilitzi.

Inicialment es va fer servir el mòdul HC-12 (Il·lustració 6-13), aquesta incorpora un xip que permet treballar amb distàncies màximes de 1000m i radiofreqüències de 433MHz, no obstant això, les proves reals han demostrat que per obtenir resposta a les distàncies anunciades s'ha de disposar d'una font d'alimentació altament estable, una antena especial i un mòdul amb protecció contra radiació. L'HC-12 doncs, en proves de camp i amb l'antena predeterminada, té un rang màxim entre 100m i 150m. No permet doncs rebre dades durant el vol, tot i així, com el seu preu és tan baix segueix sent una bona opció, ja que si es camina amb l'antena receptora cap a la direcció general en la qual ha caigut el coet, aquest s'acabarà localitzant.

Una investigació del mercat ha portat l'atenció als mòduls de 3DR SikRadio (Il·lustració 6-15), es tracta de dispositius que treballen fent servir un protocol de comunicació MavLink i permeten la transmissió de senyals TTL. Aquests estan disponibles en dues versions, una de 915MHz, que serveix per exemple per als EE.UU. i un altre de 433MHz que, com s'ha descrit en l'apartat 5.2, serveix per a Espanya i la majoria de la Unió Europea. A més, a la web ArduPilot.org (15) es presenta una taula amb les configuracions que s'han d'aplicar per respectar les legislacions vigents a cada país. Per al cas concret d'Espanya s'ha contrastat la configuració descrita en aquesta web amb el document del BOE i és correcte.

Aquestes antenes 3DR són doncs les candidates perfectes per les comunicacions UART, l'inconvenient és la diferència de preu, ja que en aquest cas gira entorn dels 35€.

Quant a la connexió, el microcontrolador fa ús de protocols UART i no té cap problema per ser connectat directament a l'antena, no obstant però, per a l'ordinador serà necessari utilitzar un adaptador USB a TTL FTDI (Il·lustració 6-14). Per fortuna, aquesta antena en concret disposa d'un FTDI integrat accessible mitjançant el port micro-USB i ja no és necessari doncs l'ús de l'adaptador.



Il·lustració 6-13 HC-12 [Font: Venedor Aliexpress]



Il·lustració 6-14 Adaptador FTDI [Font: Venedor Aliexpress]



Il·lustració 6-15 Antena 3DR de 433MHz [Font: Venedor Amazon]

7. Procediment de disseny final del coet.

7.1 Determinació del diàmetre.

A l'apartat 6.1.3 El motor de la viabilitat estructural sobre el motor, es diu que el motor haurà de tenir un diàmetre entre 29 mm per poder obtenir una compatibilitat amb els motors de categoria L1 (H i I). Això vol dir que el diàmetre ha de ser d'almenys 29 mm, els dos factors principals que marcaran si aquesta mida és possible són: per un costat l'alçada màxima que s'hi pugui obtenir, per l'altre, que el diàmetre del coet no influeixi en la capacitat d'afegir tota l'electrònica. Partint de la idea que l'electrònica anirà encapsulada en una muntura impresa en 3D amb el circuit imprès de forma vertical al mig i tenint en compte que el component més gran mesura 25 mm d'ample, es pot arribar a la conclusió que 38mm de diàmetre hauria de ser espai suficient. No obstant això, un cop superat l'examen L1 s'obté accés a tot un ventall de motors de 38mm de diàmetre, és doncs una bona idea construir un coet de 50mm que serveixi també per aquest tipus de motors.

7.2 Alliberament del sistema de recuperació.

Quant a l'ejecció del paracaigudes, com es farà servir un sistema d'ejecció controlada per microcontrolador amb altímetre, s'haurà de fer servir un sistema anomenat de pistó. El funcionament es força simple i es descriu a continuació:

Retornant a la Il·lustració 5-2, el coet està dividit en quatre parts, el con, la secció principal, la badia electrònica i la secció motor. Així doncs, el coet estarà format per dos tubs units entre ells, el superior serà la secció principal i l'inferior contendrà tant la badia electrònica com el motor. Just a la unió. S'hi posa un cilindre de diàmetre reduït que aconsegueix dues funcions. Per un costat permet caragolar les seccions, per l'altra, allotjarà una petita càrrega i serà l'àncora del coet per a penjar el paracaigudes. La idea és doncs, detonar la càrrega en l'Ap, aquesta alliberarà gasos que s'expandiran ràpidament i voldran sortir empenyent el con.

Per evitar fer mal bé el paracaigudes i assegurar un cop sec, s'hi posa una secció de tub que es mourà lliurement just a sobre de la càrrega anomenada pistó. En resum, la càrrega detona en l'Ap, els gasos empenyen el pistó situat sota el paracaigudes i tot surt ejectat per la part superior del coet.

Cal dir que es disposa de tres ancoratges, un al con, un altre al paracaigudes i l'últim a la unió. Entre els dos hi passa una corda de niló d'unes tres vegades la longitud de la secció superior. Aquesta corda manté totes les parts unides i conservarà el paracaigudes lluny del coet per evitar enxarxaments.



Il·lustració 7-1 Sistema d'alliberament per pistó [font: Elaboració pròpia]

7.3 Disseny final.

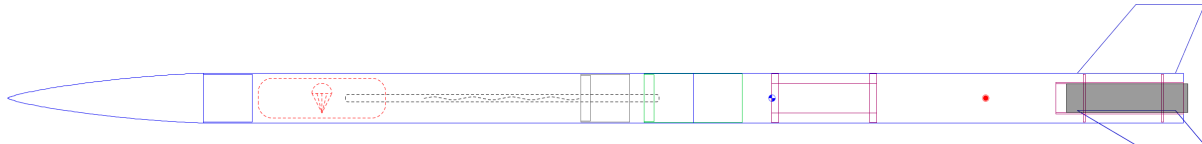
Amb les decisions de diàmetre, forma del con (6.1.1) i forma de les aletes (6.1.4) ja preses, s'ha construït un model bàsic amb el software Open Rocket i s'ha anat provant diferents motors. El millor motor sub-L1 que permet fer l'examen i dóna una altura màxima és el model G76G-4 d'Aerotech, es tracta d'un motor recarregable o sigui que també s'ha de comprar l'encapsulat RMS 29/40-120. Disposa d'un impuls total de 115 N*m i el primer Ap simulat és de 750m. Aquesta recàrrega és de la família "Mojave green (G)", es tracta de la família de motors amb més impuls específic i expulsa una flama d'un color verd molt característic.



Il·lustració 7-2 Encapsulat RMS 29/40-120 [Font: SierraFox Hobbies]

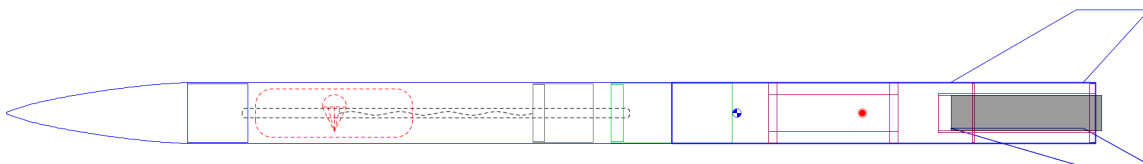
Un cop escollit el motor, s’ha iterat el disseny del coet per a obtenir la màxima altura possible sense sacrificar estabilitat.

El disseny inicial partia de dos tubs sense tallar (50 cm de fàbrica), paràmetres d’ales de prova i un con de 20 cm. Les simulacions han ajudat a arribar a la conclusió de què s’ha de fer servir un paracaigudes de 70 cm per aterrar de forma segura.



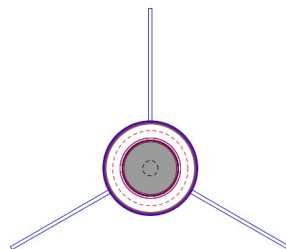
Il·lustració 7-3 Disseny Inicial [Font: Elaboració pròpia]

Iterant a poc a poc, s’ha reduït la mida del con fins a 15 cm, la secció principal a 40 cm, la secció motor a 35cm i s’ha donat una forma més aerodinàmica a les aletes. El resultat final és un coet més lleuger (448g + electrònica) i una alçada màxima de 850m.

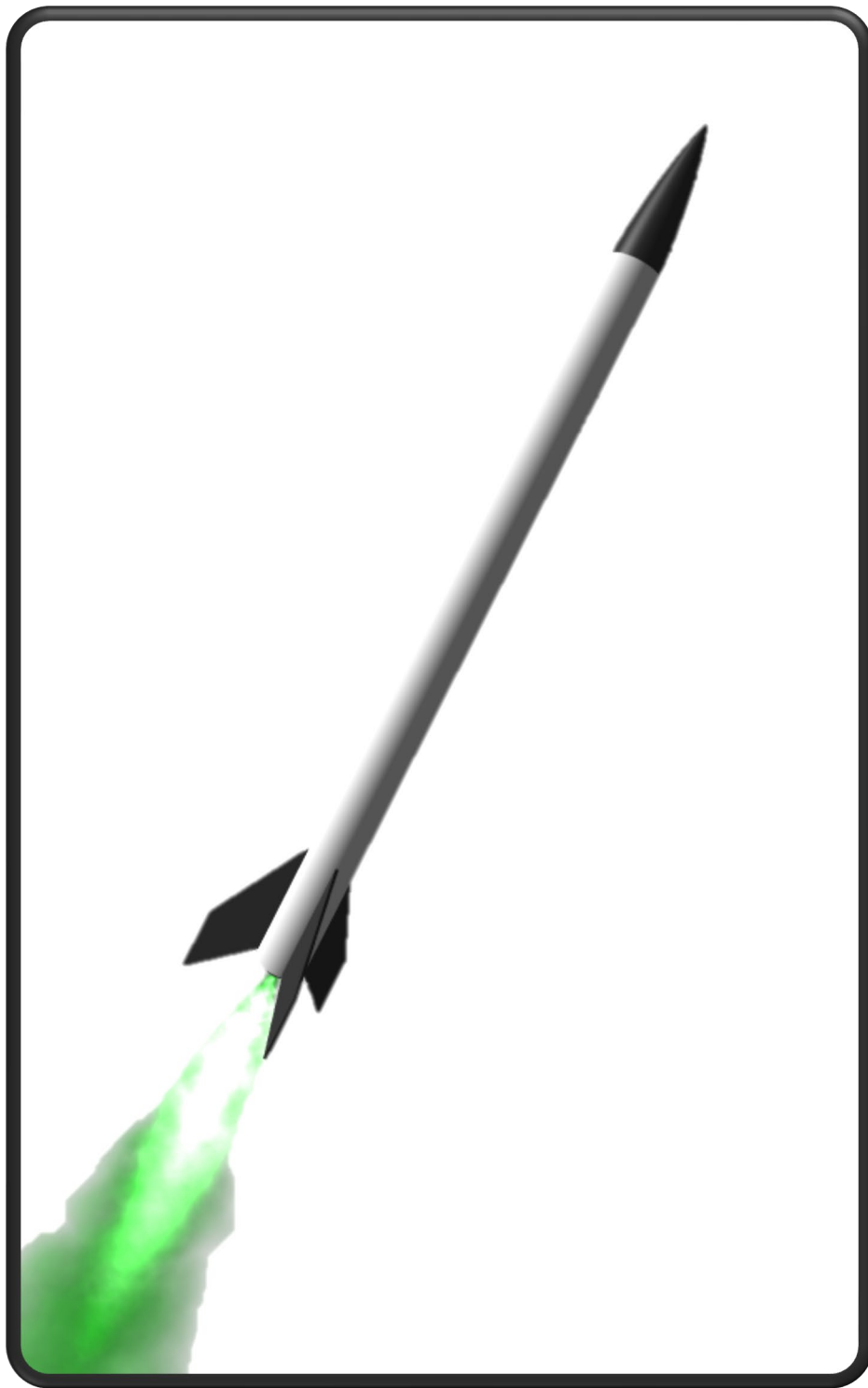


Il·lustració 7-4 Disseny final [Font: Elaboració pròpia]

Aquest disseny manté un marge estàtic (5.4.4) de 2.1 cal, és a dir, la distància entre CG i CP és de 2.1 vegades el diàmetre més gran del coet sense contar les aletes. Es considera per tant perfectament estable i molt ben balancejat.



Il·lustració 7-5 Distribució de les aletes [Font: Elaboració pròpia]



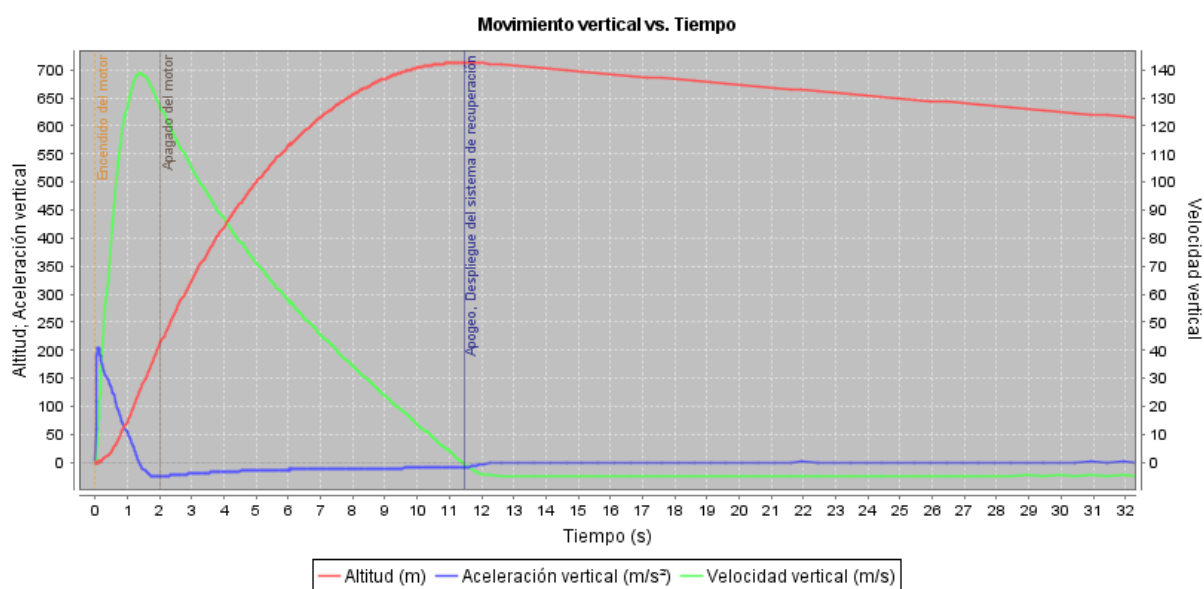
Il·lustració 7-6 Proposta de Disseny 3D [Font: Elaboració pròpia]

7.4 Simulacions de vol mitjançant OpenRocket.

Fent servir el model del coet i el software Open Rocket, es poden crear simulacions de molts factors. Un bon lloc per obtenir aquestes dades és windy.com, es tracta d'un web que dóna accés fins i tot a les dades meteorològiques dels aeroports i petites estacions. Les condicions inicials per les simulacions han estat:

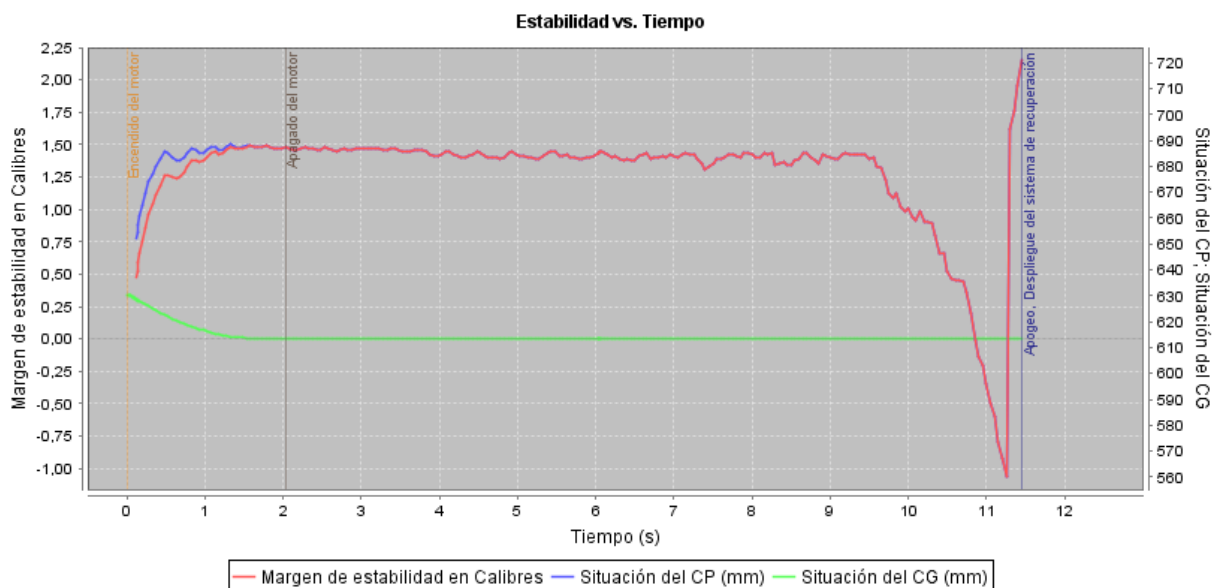
- Vent mitjà 2m/s
- Desviació estàndard de 0,2 m/s
- Turbulències 10%
- Direcció del vent 90° (Per una simulació no importa gaire, ja que és un factor que varia cada minut)
- Temperatura 18°C (~Temperatura mitjana entre maig i juny)
- Apertura del paracaigudes a l'Ap

A la Il·lustració 7-7 es pot observar un Ap de 713 m al cap d'11.4 s, una velocitat màxima de 140 m/s al cap de 1.4 s i una acceleració màxima de 204 m/s² que, tot i ser molt elevada (20G al segon 0.07), té una duració molt curta i disminueix ràpidament.

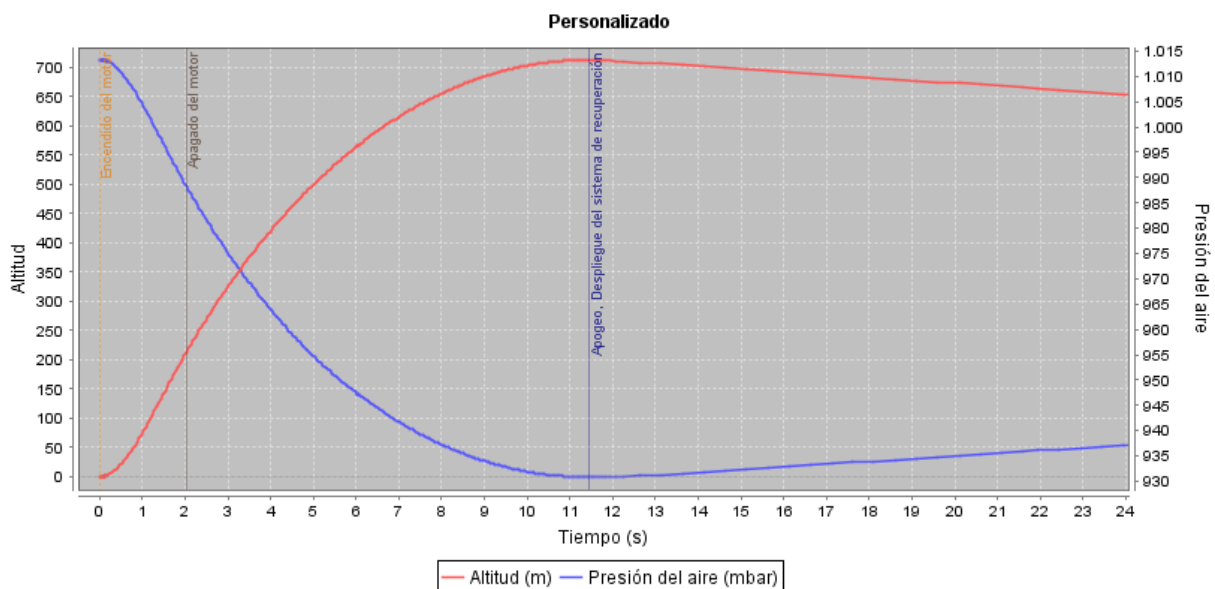


Il·lustració 7-7 Altitud i velocitat [Font: Elaboració pròpia]

En la Il·lustració 7-8, es pot veure l'evolució del marge estàtic i la posició del CP i CG en el temps, és important notar que aquesta informació només és rellevant fins al moment de l'apertura del paracaigudes (Ap). El CG s'acosta al con per causa de la disminució de la massa del motor El CP però, varia amb la velocitat i l'angle d'atac, per aquesta raó té una mica d'efecte "ripple", ja que les aletes estan corregint la trajectòria. Es veu doncs que el marge estàtic es manté en tot moment en valors segurs fins a l'apertura del paracaigudes. Un altre gràfic interessant és la projecció del canvi de pressió atmosfèrica amb l'altura (Il·lustració 7-9).

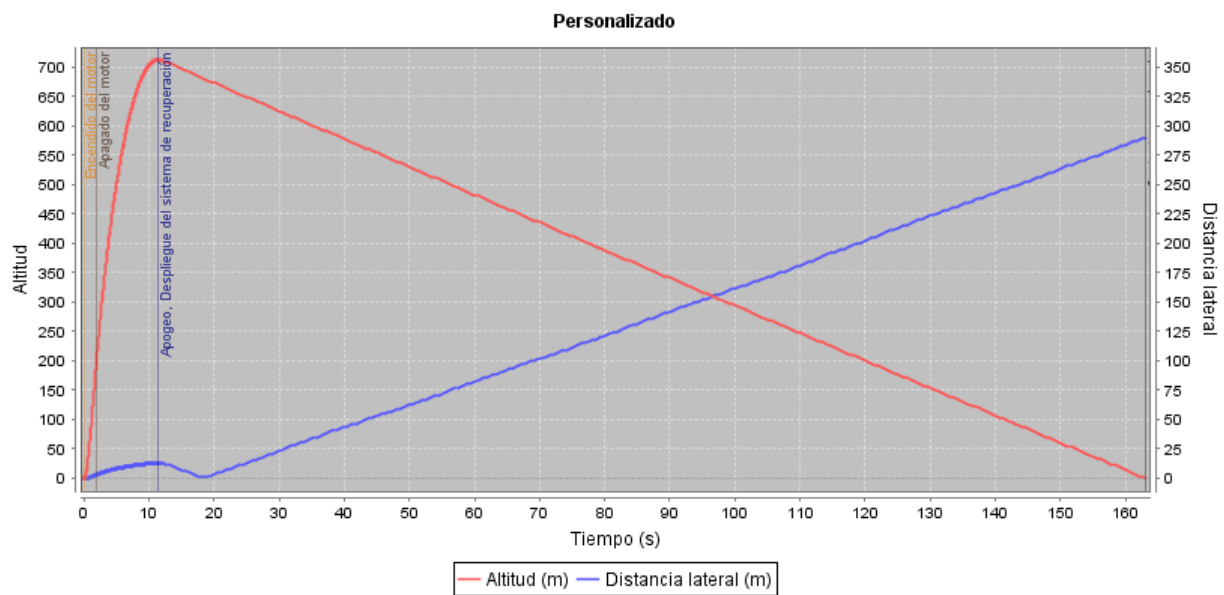


Il·lustració 7-8 CP, CG i marge estàtic [Font: Elaboració pròpia]



Il·lustració 7-9 Pressió atmosfèrica i altura [Font: Elaboració pròpia]

Finalment per testejar la distància d'aterrament màxima amb aquestes velocitats, s'ha realitzat un gràfic de seguiment terrestre disponible a la Il·lustració 7-10. La distància lateral no és més que la distància entre el coet i la persona vista des del cel. S'arriba a la conclusió que el coet no pot aterrar a més de 300 m, distància coberta per les antenes 3DR tot havent-hi un bosc, com es demostra en l'apartat 12.4. És possible doncs, en cas de perdre la connexió durant el vol, obtenir les dades de coordenades GPS un cop a terra.



Il·lustració 7-10 Seguiment terrestre [Font: Elaboració pròpia]

7.5 Modelització 3D del coet.

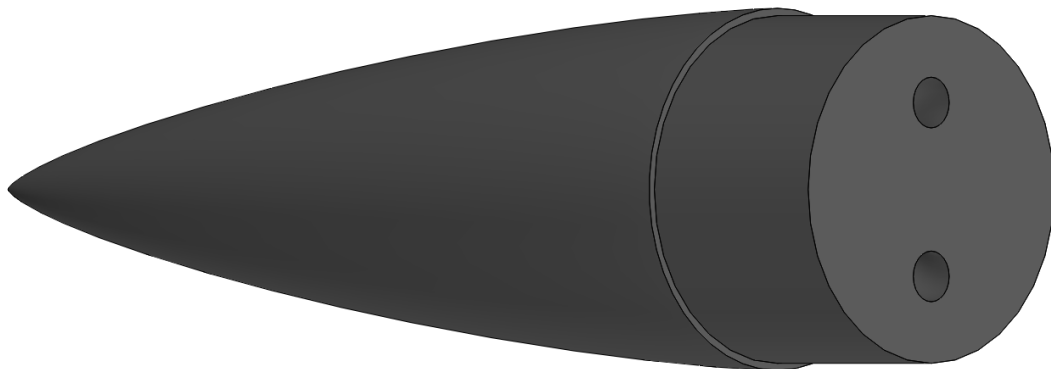
El disseny d'un model 3D complet del coet amb Solidworks facilita les tasques de disseny de les peces individuals que s'han d'imprimir en 3D. També es té l'avantatge de què amb un model així es poden realitzar simulacions de fluids, en aquest cas simulacions de tipus túnel de vent.

A continuació es llisten les peces que s'han d'imprimir en 3D.

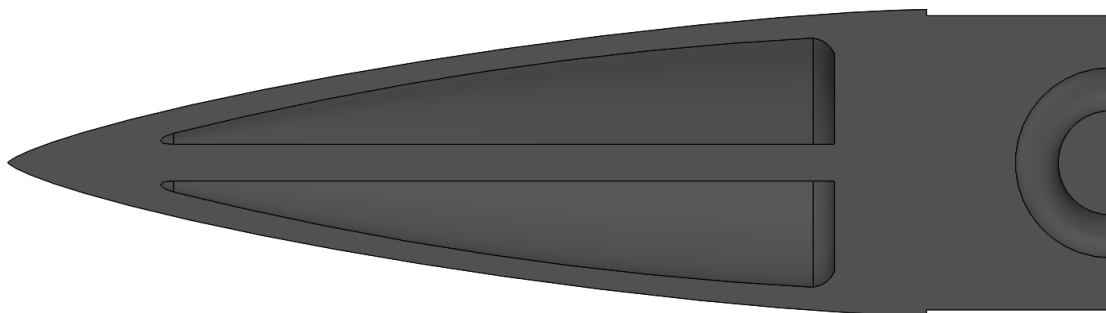
7.5.1 Model 3D del con.

Mitjançant la fórmula 7.1, creada a partir de les fórmules 6.1 i 6.2, s'ha creat la corba LV-Haack de sèrie 0, es a dir, la corba Von Karman. La Il·lustració 7-11 mostra el disseny final exterior, la Il·lustració 7-12 mostra la secció tallada. A la base es pot veure com el disseny disposa d'un ancoratge per a passar la subjecció de niló.

$$(25/\sqrt{\pi}) * \sqrt{(\arccos(1-(2*x)/150) - \sin(2*\arccos(1-(2*x)/150)))/2} \quad (7.1)$$



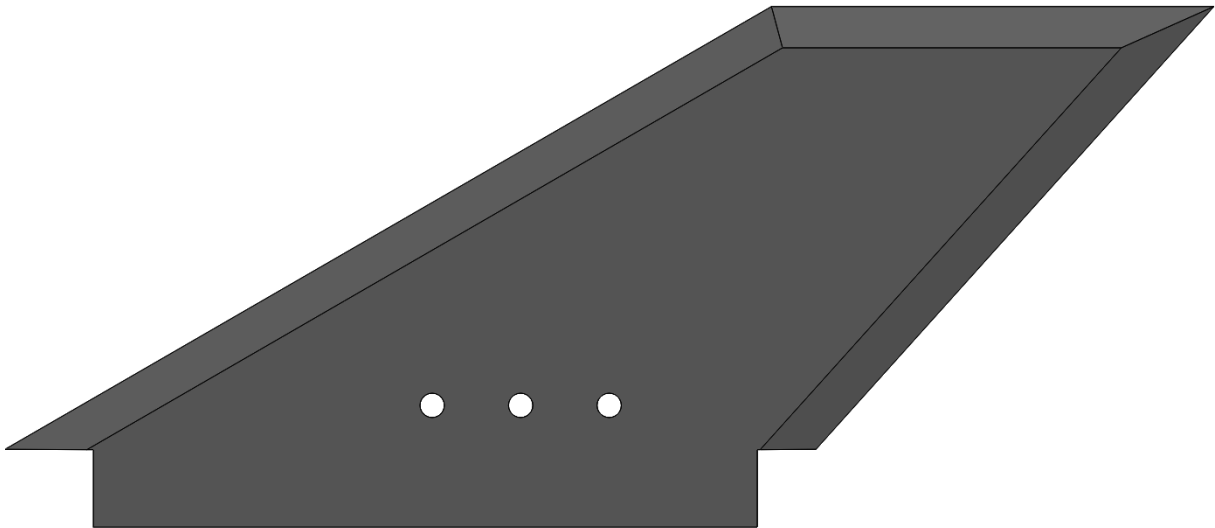
Il·lustració 7-11 Model 3D Von Karman [Font: Elaboració pròpia]



Il·lustració 7-12 Secció 3D Von Kaman [Font: Elaboració pròpia]

7.5.2 Model 3D de l'aleta.

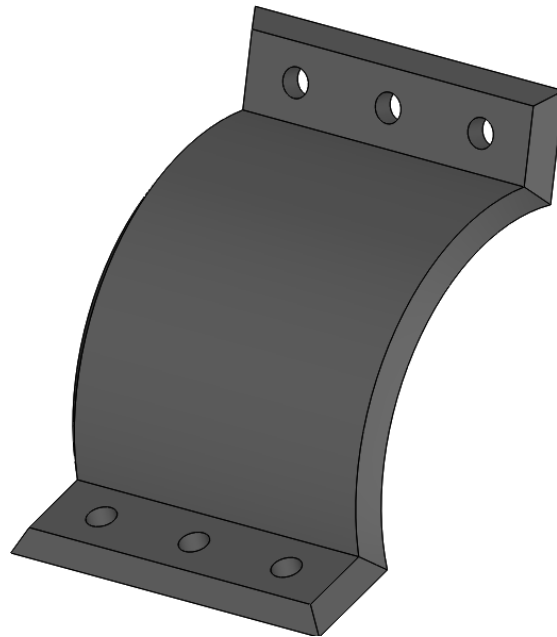
Com s'ha especificat en el disseny, l'aleta és de tipus Swept. Aquesta disposa de tres forats per ancorar-la amb uns retenidors. També s'ha afegit una ranura que entra dins del cos del coet i dóna suport extra al bloc motor.



Il·lustració 7-13 Model 3D de l'aleta [Font: Elaboració pròpia]

7.5.3 Model 3D dels retenidors per aleta.

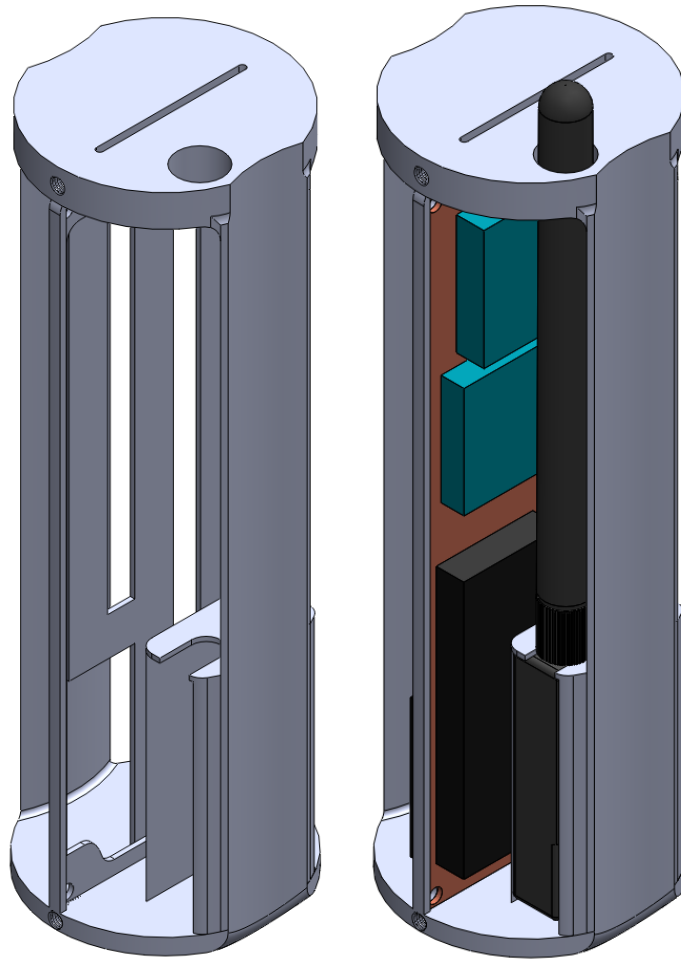
S'ha decidit afegir un reforç a les aletes per tal d'augmentar dràsticament la seva resistència així com assegurar la seva orientació. La Il·lustració 7-14 mostra el model 3D d'aquest. El seu funcionament però es veu més clar en l'assemblatge final.



Il·lustració 7-14 Retenidors d'aleta [Font: Elaboració pròpia]

7.5.4 Model 3D de la badia electrònica.

La badia s'encarrega d'emmagatzemar i mantenir en posició la PCB, la bateria i l'antena, així com de protegir-los dels gasos calents provinents del coet, els quals seran desviats pels laterals del disseny.

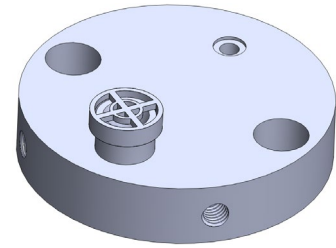


Il·lustració 7-15 Badia electrònica [Font: Elaboració pròpia]

7.5.5 Model 3D del pistó.

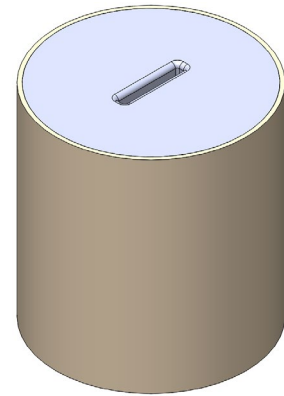
Aquesta peça està formada per dues parts:

Primer es troba la base del pistó, es tracta d'una peça estanca que serveix de tapa per als gasos, d'ancoratge per al paracaigudes i per col·locar la càrrega explosiva. També disposa d'una vàlvula unidireccional per als gasos provinents del motor.



Il·lustració 7-16 Base Pistó [Font: Elaboració pròpia]

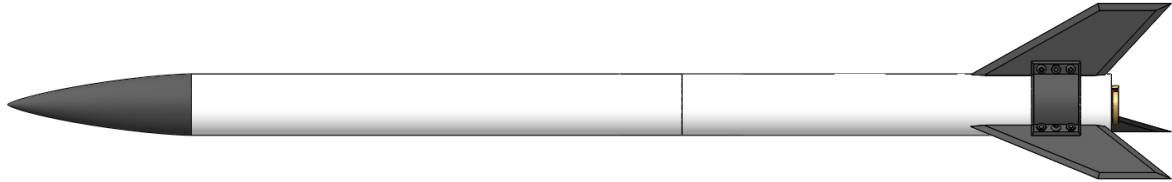
En segon lloc es troba la part superior del pistó, aquesta és una tapa impresa en 3D sobre un cilindre de cartó fenòlic de diàmetre reduït. La seva funció és desplaçar-se ràpidament amb l'expansió dels gasos empenyent el paracaigudes fora del coet. Disposa d'una apertura per a passar la corda de niló.



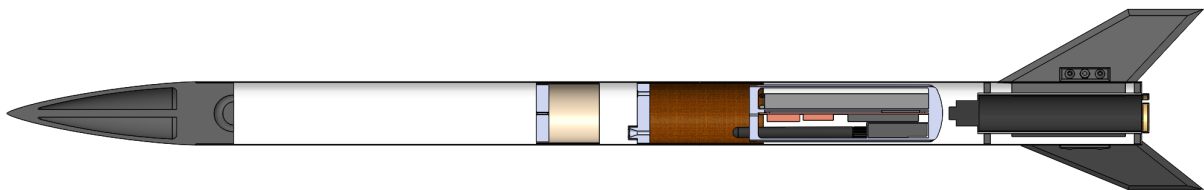
Il·lustració 7-17 Pistó [Font: Elaboració pròpia]

7.5.6 Assemblatge 3D final.

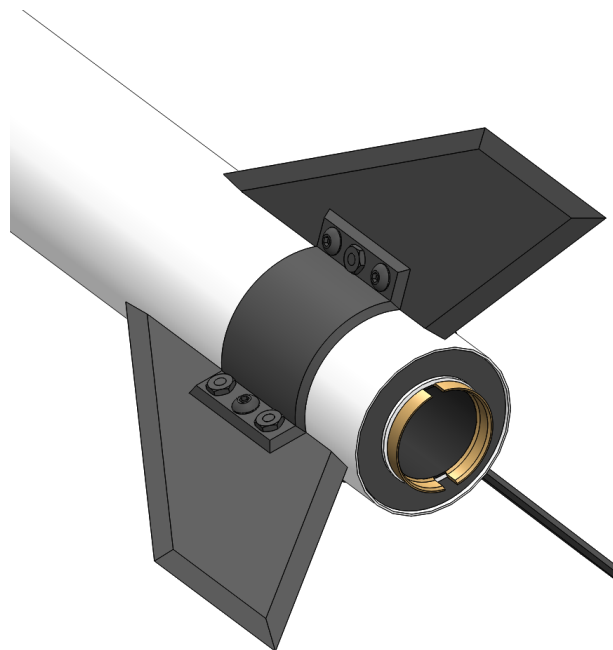
Després de dissenyar totes les peces en 3D el resultat de l'assemblatge es el següent:



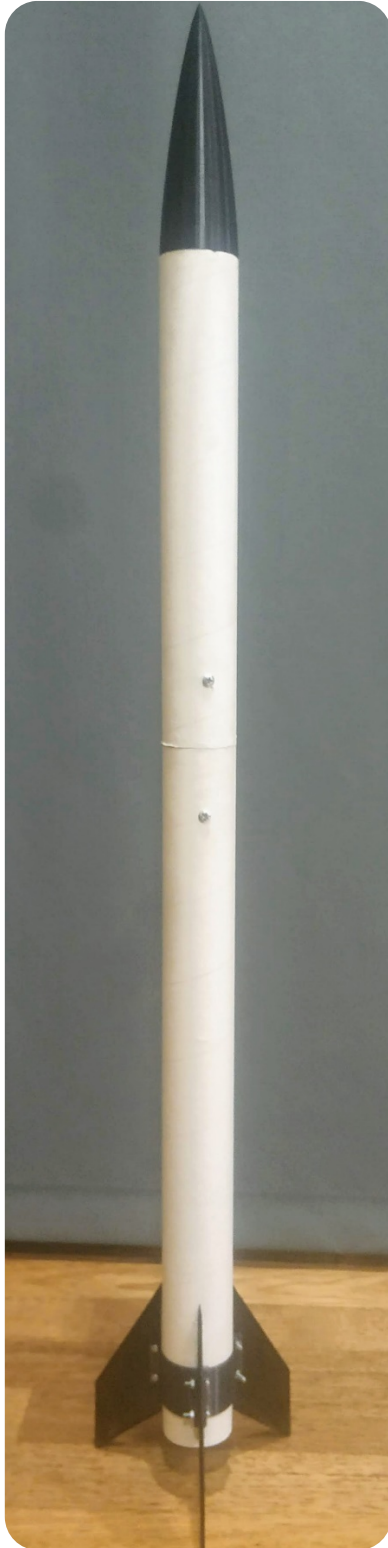
Il·lustració 7-18 Assemblatge 3D Final [Font: Elaboració pròpia]



Il·lustració 7-19 Assemblatge 3D estructural (secció) [Font: Elaboració pròpia]



Il·lustració 7-20 Model 3D part posterior [Font: Elaboració pròpia]

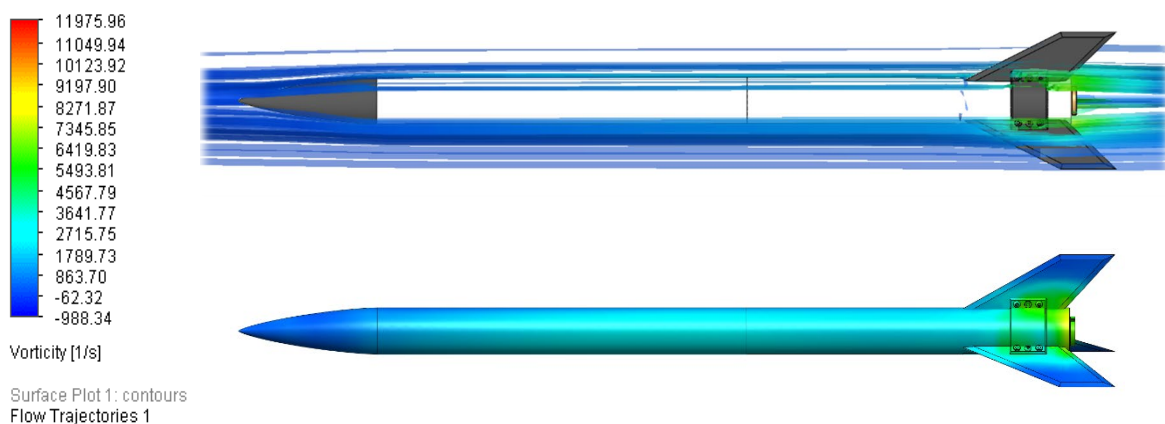
*Il·lustració 7-21 Assemblatge real*

7.5.7 Simulacions de túnel de vent amb el model 3D.

S'han realitzat les simulacions amb els següents paràmetres:

- Coet sota efectes de la gravetat
- Vent laminar i turbulent
- Superfície adiabàtica
- Pintura de 60 micròmetres de rugositat
- Pressió de 101324.31 Pa
- Temperatura de 288.15 K
- Velocitat 220 m/s
- Turbulències del 10%

La vorticitat representa la tendència d'un fluid a rotar i està directament relacionada amb les turbulències. Aquestes poden tenir efectes catastròfics en l'estabilitat del coet. Visualment, si s'estudia la vorticitat per aquest model es pot veure que la part crítica succeeix entorn de la base de les aletes i els retenidors d'aquestes. Té força sentit, ja que és una zona que pateix un desplaçament d'aire força sobtat i just després hi ha una zona de "buit". Hipotèticament, si es prescindís dels retenidors, la vorticitat disminuiria lleugerament, no obstant això, la simetria del coet ajuda a contrarestar els efectes d'aquesta. A més a més, els retenidors tenen la tasca de mantenir l'orientació de les aletes i asseguren la distribució correcta d'aquestes. En conclusió doncs, desfer-se d'elles tindrà efectes contraris als desitjats i no es pot considerar com una opció.



Il·lustració 7-22 Simulacions de vorticitat [Font: Elaboració pròpia]

8. Programació i electrònica.

Tota la programació es troba disponible als annexos II i III.

A causa del possible interès del lector en replicar el projecte, aquest apartat pretén servir de guia per al muntatge i programació de l'ordinador a bord del coet. És important tornar a fer un incís en què la funció de l'ordinador a bord no és més que recopilar dades, processar-les, emmagatzemar-les i enviar-les si la distància ho permet. Amb aquestes dades el microcontrolador haurà d'efectuar l'apertura de paracaigudes i el control sobre els leds i el boozzer.

No és responsabilitat del controlador efectuar cap intervenció en la trajectòria del coet. Abans de començar, és important disposar d'un ordinador amb Windows i Linux, ja que tota la programació és molt més fàcil de fer des de Linux però el programari del microcontrolador només es troba disponible per a Windows. Aquesta guia però se centrarà en la distribució Ubuntu.

8.1 L'entorn de treball Micropython.

Hi ha moltes formes de programar un microcontrolador, generalment però com més difícil és el llenguatge de programació més control es té sobre la plataforma. Per al projecte s'ha decidit fer servir Micropython, ja que és una implementació d'un llenguatge professional que disposa d'una gran varietat de llibreries.

Per a poder programar un microcontrolador habilitat amb Micropython, només es necessita una connexió al sistema d'arxius del microcontrolador en qüestió. Hi ha diferents protocols per establir aquesta connexió: Sèrie, FTP, SSH, etc. En el cas de la plataforma escollida per al projecte es pot fer servir una connexió USB normal. Dins la memòria flash del microcontrolador s'hi poden emmagatzemar arxius escrits en Python 3 que, sense necessitat de compilar, formaran el codi que s'executi. L'única informació important que s'ha de saber per entendre el funcionament és que hi ha dos arxius principals que s'executen automàticament. El primer a executar-se es diu "boot.py", a dins només s'inclouran les dependències principals i codi MOLT bàsic. El segon arxiu en executar-se es pot editar més lliurement, és el "main.py", aquí va el codi principal i les llibreries que es facin servir.

8.2 Instal·lació de Micropython.

S'haurà de compilar i flashejar el software de Micropython al microcontrolador.

Començant a Ubuntu s'han d'instal·lar les dependències (Python, Pip, Git i Make) fent ús del terminal i l'apt-get.

```
>> sudo apt-get install build-essential libreadline-dev libffi-dev git
pkg-config gcc-arm-none-eabi libnewlib-arm-none-eabi
>> sudo apt-get install make
>>sudo apt-get install git
```

Un cop es tinguin instal·lades, es crearà un directori on es pugui instal·lar Micropython. Obrint el terminal en aquest directori es procedirà a escriure una per una les següents instruccions:

```
>> git clone https://github.com/micropython/micropython.git
>> cd micropython
>> git submodule update --init
>> cd mpy-cross
>> make -j4
>> cd ../ports/stm32/boards
>>git clone https://github.com/WeActTC/WeAct\_F411CE.git
```

El que s'ha fet en les primeres 5 instruccions és descarregar i compilar el software de Micropython normal, tot seguit s'ha descarregat el software per a compilar el firmware de la placa, però és necessari que abans es faci un canvi en el codi, ja que es fa servir una memòria flash SPI. S'ha fet servir la gamma de memòries externes de Winbond w25q{32/64/128}. Disponible en 4(32), 8(64) i 16(128) Mb. El preu de les memòries segons la capacitat és 0,45€, 0,47€ i 0,83€ respectivament. Té sentit doncs l'elecció de la memòria de 8 Mb, ja que es capacitat més que suficient. Si no es vol fer servir cap memòria externa però, la capacitat de la memòria flash integrada és de tan sols 512Kb i un cop instal·lat Micropython només queden lliures uns 45Kb.

S'ha de buscar el directori:

Micropython/ports/stm32/boards/WeAct_F411CE

En aquest directori s'hauria de trobar un arxiu anomenat `mpconfigboard.h`, s'ha d'editar mitjançant un editor de text i canviar la línia 16:

```
"#define MICROPY_HW_ENABLE_INTERNAL_FLASH_STORAGE (1)"
```

Per:

```
"#define MICROPY_HW_ENABLE_INTERNAL_FLASH_STORAGE (0)"
```

També s'haurà de canviar la línia 103:

```
"#define MICROPY_HW_SPIFLASH_SIZE_BITS (32 * 1024 * 1024)"
```

Per:

```
"#define MICROPY_HW_SPIFLASH_SIZE_BITS (32 * 1024 * 1024)"  
"#define MICROPY_HW_SPIFLASH_SIZE_BITS (64 * 1024 * 1024)"  
"#define MICROPY_HW_SPIFLASH_SIZE_BITS (128 * 1024 * 1024)"
```

Segons si el xip de memòria es de 4 (32), 8 (64) o 16 (128) MB.

Ara es pot tornar a obrir el terminal al directori *Micropython/ports/stm32* i executar la següent instrucció:

```
>> make BOARD=WeAct_F411CE -j4
```

Un cop s'hagi acabat d'executar, hauria d'existir el següent directori:

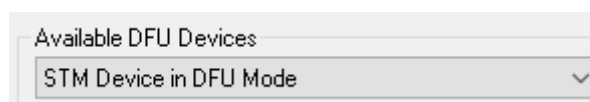
Micropython/ports/stm32/build-WeAct_F411CE

Dins s'hi troba l'arxiu `firmware.dfu` el qual haurem d'enviar a algun ordinador amb Windows.

En Windows s'ha d'instal·lar el programa DfuSe Demo que es pot trobar a la web oficial ST.com. Per al projecte s'ha fet servir la versió (v3.0.6). Un cop instal·lat i obert el programa, amb la placa i un cable USB-C disponible però sense connectar, s'ha de realitzar la següent combinació de botons a la placa:

1. Prémer i mantenir pres el botó BOOT0.
2. Prémer i mantenir pres el botó NRST.
3. Endollar l'USB.
4. Deixar anar el botó NRST.
5. Esperar un segon i deixar anar el botó BOOT0.

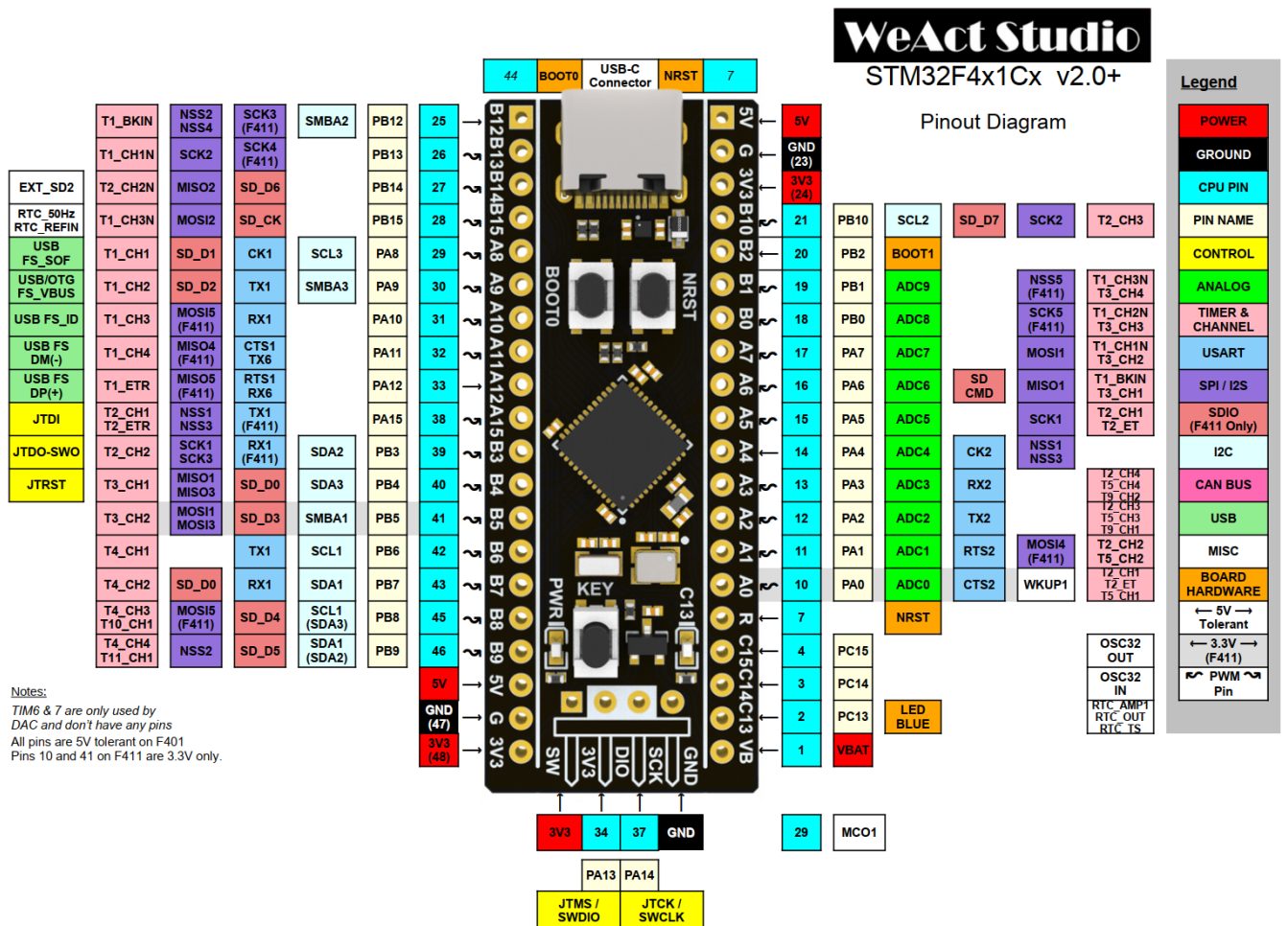
Ara la placa serà en mode DFU, un cop instal·lats els divers hauria d'aparèixer en el programa:



Tot seguit, amb l'arxiu firmware.dfu a l'ordinador i sense canviar cap setting del programa, s'ha de fer click a "Choose" en l'apartat Upgrade or Verify Action i seleccionar l'arxiu firmware.dfu. Finalment es farà click a Upgrade ignorant les advertències del programa. Un cop finalitzat es pot tancar el programa. En desconnectar i tornar a reconnectar el dispositiu, aquest cop hi hauria d'aparèixer com una unitat d'emmagatzemament externa. Dins s'haurien de trobar els arxius "boot.py", "main.py", "README.txt" i "pybcddc.inf".

8.3 El microcontrolador en detall (WeAct-STM32F411).

En l'àmbit de la programació de microcontroladors, tant en Micropython com Arduino o altres, és molt reconeguda la plataforma de desenvolupament “Blue Pill”, es tracta d’una placa que incorpora un Cortex-M3 STM32F103C8T6. Tot i ser molt popular i estimada, el projecte fa servir un predecessor més potent conegut popularment com a “Black Pill 2”, es tracta d’un Cortex-M4 STM32F411C6 que disposa de connexió USB-C i és capaç de processar unitats de punt flotant. La següent il·lustració mostra els noms dels pins i totes les funcions que poden efectuar.



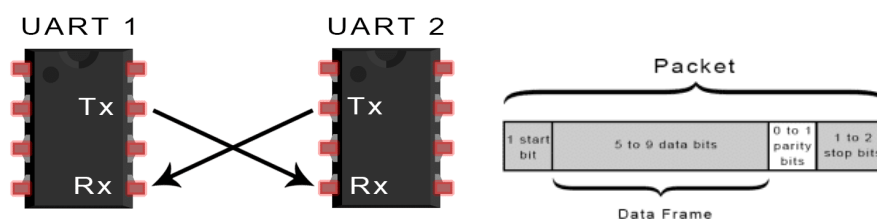
Il·lustració 8-1 Plataforma STM32 [Font: GitHub WeActTC]

8.3.1 Protocols de comunicació disponibles.

Aquesta plataforma de desenvolupament disposa bàsicament de tres protocols de comunicació: USART, I2C i SPI. Quant a connexions USART hi ha un màxim de tres, (USART1, USART2 i USART6) no obstant això, els pins PA11/PA12, que inclouen les connexions USART6, estan reservades per a la connexió USB i no s'han de fer servir, per tant en realitat només es disposa d'USART1 i USART2. Pel que fa a I2C (I2C1, I2C2 i I2C3), totes les entrades i sortides són vàlides sempre que no se superposin amb les USART. En relació amb l'SPI, es disposa de fins a cinc canals, tanmateix, no es poden fer servir tots a l'hora (SPI1, SPI2, SPI3, SPI4 i SPI5). Per al projecte, es farà servir tots els protocols segons el tipus de connexió que faci cada mòdul.

8.3.2 Protocol USART.

Les comunicacions USART (i UART) es fan mitjançant els pins RX i TX en una connexió creuada similar a la de l'Il·lustració 8-2. La informació s'envia de transmissor a receptor en paquets de dades com es pot veure també en la Il·lustració 8-2. En aquest projecte els dispositius que utilitzen aquest tipus de comunicació són l'antena HC-12 (USART1) i el mòdul GPS (USART2).



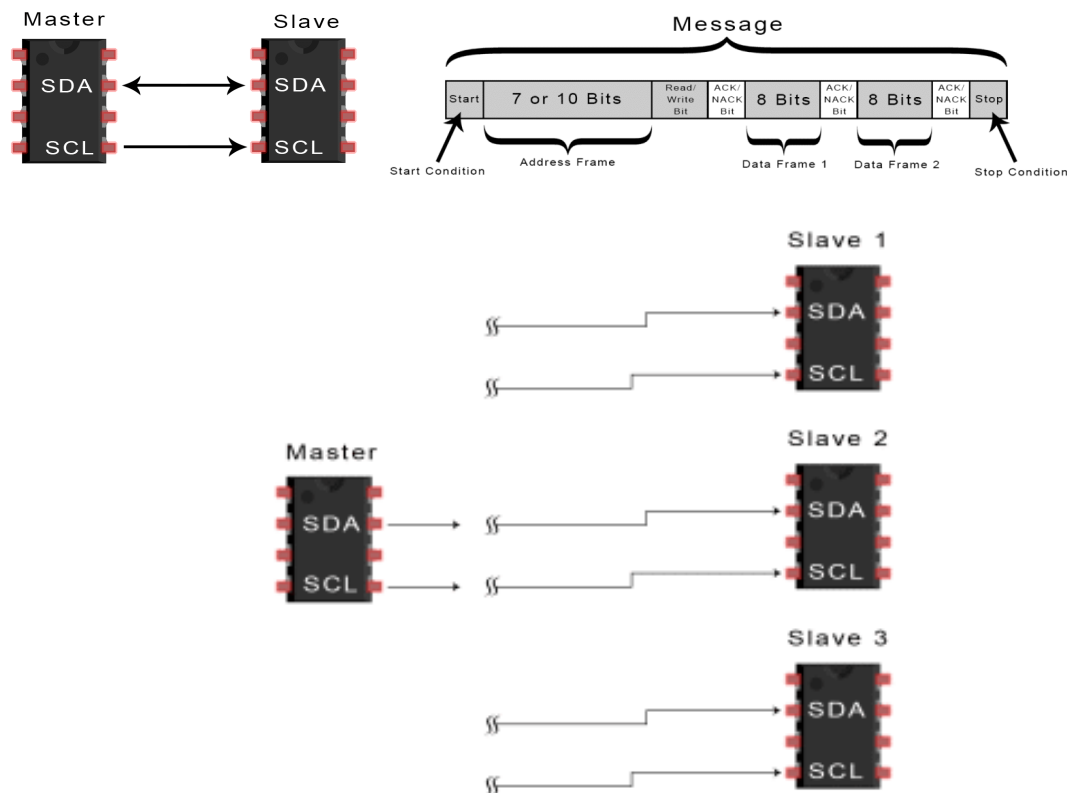
Il·lustració 8-2 USART [font: circuitbasics.com]

8.3.3 Protocol I2C.

Es tracta d'una connexió multibus Half-Duplex en la que un dispositiu principal “master”, disposa d'un seguit de dispositius al seu servei “slaves”. Tot i ser esquemàticament molt similar al USART, el protocol I2C és diferent:

Per començar, es disposa d'una via SCL, que és una sortida de rellotge directament des del microcontrolador, és per tant una connexió sincronitzada.

Com és Half-Duplex, l'enviament i recepció de dades es fan pel mateix bus, tot comença amb un bit d'inici provinent del master i la direcció del xip o sensor al qual s'adreça, a continuació el microcontrolador passa a esperar les dades.

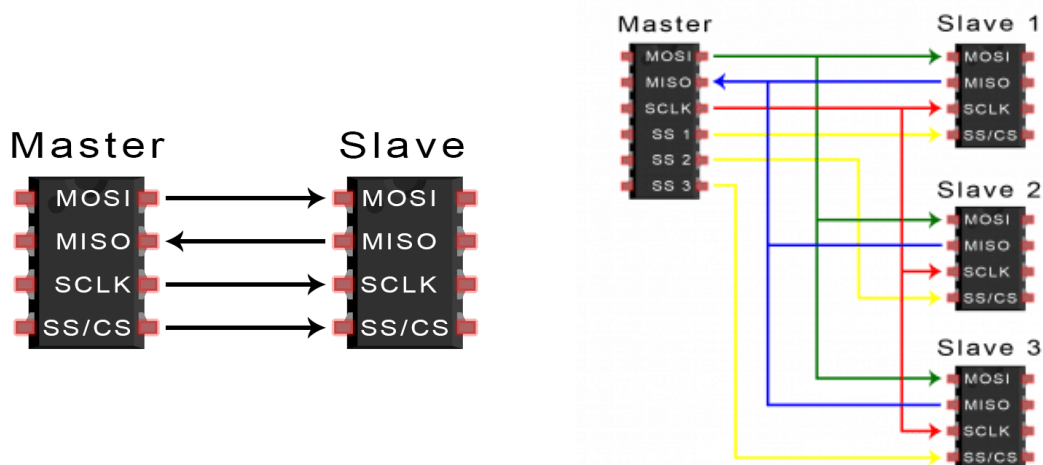


Il·lustració 8-3 Connexions I2C [Font: circuitbasics.com]

8.3.4 Protocol SPI.

L'SPI és un protocol de connexió multibus Full-Duplex, en la que un dispositiu principal “master”, disposa d'un seguit de dispositius al seu servei “slaves”. En ser full dúplex, apareix un nou pin de transmissió de dades respecte a l'I2C, també s'abandonen els bits d'adreçament i apareix un nou pin de selecció de xip (SS o CS). Finalment, es disposa d'un pin SCK, que és el rellotge amb el qual funcionaran els slaves, és l'equivalent al pin SCL de l'I2C.

Els pins de transmissió de dades són MOSI i MISO, a diferència dels RX i TX, aquest cop la connexió es fa MISO-MISO i MOSI-MOSI, la millor forma de recordar-ho és entendre el significat, MISO vol dir “Master Input Slave Output” i MOSI vol dir “Master Output Slave Input”. Entenent el significat doncs té sentit realitzar connexions directes.



Il·lustració 8-4 Connexió SPI [Font: circuitbasics.com]

L'avantatge principal d'aquest protocol és que no fa falta bit de start i stop, les dades es poden enviar i rebre sense interrupció, la velocitat de transmissió és el doble que la d'I2C, l'inconvenient però és que la connexió requereix el doble de cables que en I2C o UART i no hi ha cap forma de saber que les dades s'han rebut correctament. El projecte la farà servir només per connectar l'adaptador de micro SD.

8.3.5 Monitor Sèrie REPL.

Per a poder interactuar amb el microprocessador i enviar comandaments directament, així com veure la resposta d'aquests, existeix una potent interfície anomenada REPL. Per accedir-hi s'hi pot fer des del terminal Linux o des de PuTTY.exe en Windows. La connexió es realitzarà mitjançant USB o l'antena HC-12, si s'hi disposes, també és possible mitjançant WiFi o Bluetooth. Per al projecte, s'ha fet servir la instrucció:

```
>> sudo picocom /dev/(adreça TTY) -b115200
```

sudo: atorga permisos d'administrador.

picocom: s'ha d'instal·lar amb apt-get, permet emular el terminal del microcontrolador.

/dev/(adreça TTY): és l'adreça a la qual s'ha de comunicar el picocom, s'ha de determinar segons el tipus de connexió.

-b115200: velocitat de la comunicació en bauds, igual a 115200 Hz. També es coneix com a "bit-rate" o "bits per segon".

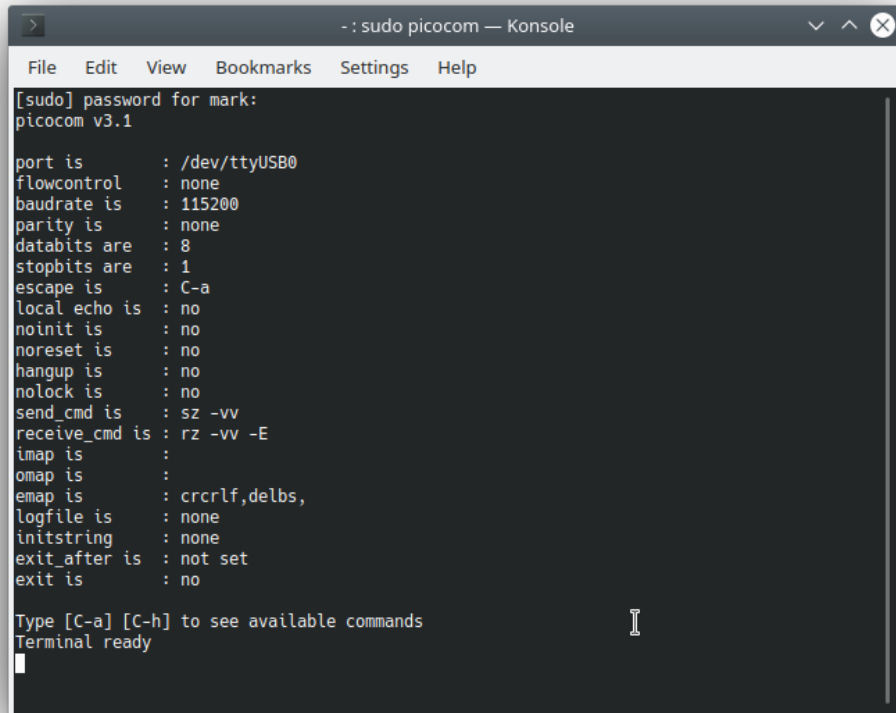


La millor manera per a descobrir l'adreça TTY que s'ha d'escriure en el picocom és connectar el dispositiu ja sigui mitjançant FTDI o USB i escriure en un terminal:

```
>> dmesg | grep tty
```

El resultat que s'obté és un llistat dels dispositius que s'han connectat i les seves adreces TTY. Com el llistat és cronològic, l'adreça que es necessita hauria d'aparèixer l'última. Per al meu cas, la connexió per USBC era **ttyACM0** i la connexió mitjançant FTDI i 3DR era **ttyUSB0**.

Un cop s'hagi efectuat correctament la connexió, hauria d'aparèixer una finestra similar a la de l'Il·lustració 8-5. Aquest terminal actua d'una forma similar o equivalent al Shell interactiu que ofereix un compilador Python normal com per exemple PyCharm.



```
 -: sudo picocom — Konsole
File Edit View Bookmarks Settings Help
[sudo] password for mark:
picocom v3.1

port is      : /dev/ttyUSB0
flowcontrol  : none
baudrate is  : 115200
parity is    : none
databits are : 8
stopbits are : 1
escape is    : C-a
local echo is : no
noinit is    : no
noreset is   : no
hangup is    : no
nolock is    : no
send_cmd is  : sz -vv
receive_cmd is : rz -vv -E
imap is      :
omap is      :
emap is      : crCrLf,delbs,
logfile is   : none
initstring   : none
exit_after is : not set
exit is      : no

Type [C-a] [C-h] to see available commands
Terminal ready
█
```

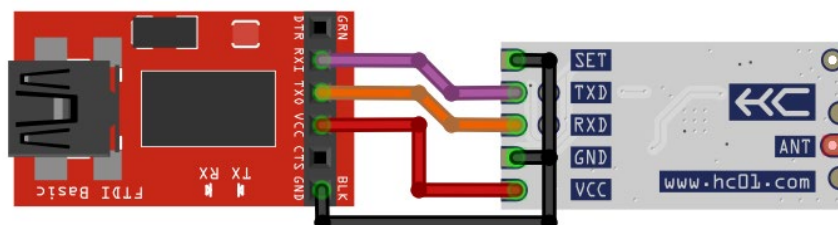
Il·lustració 8-5 picocom [Font: Elaboració pròpia]

8.4 Connexió i configuració de les antenes HC-12 i 3DR.

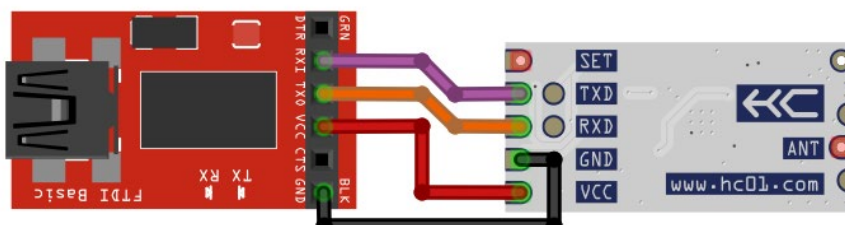
Els mòduls antena HC-12 i 3DR, permeten establir una connexió UART a distància, es a dir, aquesta connexió dóna accés al monitor REPL sense necessitat de fer servir cap cable USB. L'únic requisit es que es disposi de dues antenes, que tinguin la mateixa configuració i que estiguin connectades correctament.

Com les comunicacions de les antenes són UART, no hi ha problema per connectar-la directament al microcontrolador, el projecte fa servir la interfície USART1 amb els pins A9 i A10. No obstant això, l'ordinador no s'hi pot connectar directament, per aquest motiu es necessita un traductor USB-UART, es tracta de l'FTDI.

Hi ha dos tipus de connexió per l'HC-12, la de configuració (Il·lustració 8-6) i la d'ús (Il·lustració 8-7). La connexió de configuració es realitza connectant a terra el pin "SET" abans d'alimentar-lo a 5V. Durant un ús normal aquest pin s'haurà de deixar desconnectat. Per al cas de l'antena 3DR, aquesta es connecta de la mateixa manera que la HC-12, amb la diferència de què no disposa de cap pin "SET". Alternativament, si es connecta per Micro-USB, ja disposa d'un FTDI integrat.



Il·lustració 8-6 Connexió de configuració HC-12 [Font: Elaboració pròpia]

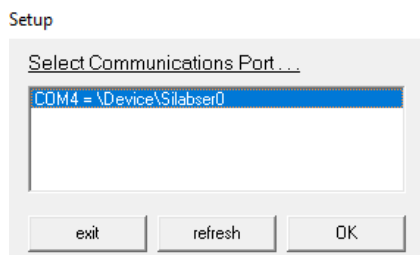


Il·lustració 8-7 Connexió d'ús HC-12 i 3DR [Font: Elaboració pròpia]

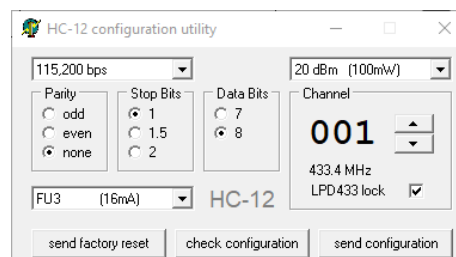
Per a iniciar la configuració de l'HC-12, primer s'ha de connectar en mode configuració com es mostra a la Il·lustració 8-6. Tot seguit l'FTDI s'haurà de connectar a l'ordinador amb Windows. Es farà servir una eina visual i molt pràctica anomenada HC-12 configuration utility disponible a (16) GitHub.com i creada per Robert Rozee. Aquesta hauria de ser capaç de detectar el dispositiu (Il·lustració 8-8) i oferir certes opcions per a configurar-lo. Degut a la naturalesa del projecte, es d'interès prioritzar la distància de comunicació per sobre del consum, s'ha de replicar doncs la configuració de la Il·lustració 8-9 i fer click en send configuration. És important utilitzar el bit-rate de 115200 bps ja que es la velocitat de comunicació que té el microcontrolador. Un cop enviada, es pot comprovar que la configuració és correcta fent click a check configuration i comparant amb la Il·lustració 8-10.



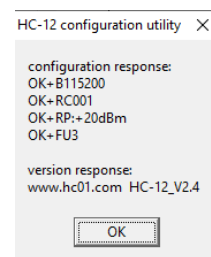
IMPORTANT: Aquesta configuració s'haurà de realitzar de manera idèntica amb els dos mòduls HC-12. Un cop acabat no s'haurà de tornar a connectar el pin "SET", ja que hi ha risc de restablir la configuració de fàbrica.



Il·lustració 8-8 HC-12 detectat [Font: Elaboració pròpia]



Il·lustració 8-9 Configuració HC-12 [Font: Elaboració pròpia]



Il·lustració 8-10 Check Configuració HC-12 [Font: Elaboració pròpia]

Per a l'antena 3DR, el procés és una mica diferent, ja que aquestes disposen d'un connector Micro USB per a la configuració. El primer pas doncs és connectar les dues antenes a l'ordinador, o almenys una i que l'altra tingui alimentació d'algun tipus. Un cop connectades, un led verd (model de 915MHz) o blau (model de 433 MHz) hauria de pampallugar un parell de vegades i quedar-se encès per senyalitzar que s'ha realitzat connexió radio (link) entre les antenes, si no succeeix significa que l'antena està defectuosa o tenen diferents configuracions cadascuna. Tot seguit, s'ha d'obrir l'administrador de dispositius, com els divers s'instal·len automàticament aquesta hauria d'aparèixer com "Silicon Labs CP210x USB to UART bridge" en l'apartat ports (COM & LPT) S'ha de fer doble click i polsar la finestra "Port Settings" on es permet seleccionar els bits per segon per a la configuració. És important que aquest número sigui el mateix que el de la configuració de l'antena, ja que si no serà impossible comunicar-se. Si aquesta és la primera configuració se seleccionarà 57600, ja que és la velocitat de fàbrica.

Quant al software de configuració hi ha 2 opcions, tot i que en veritat venen a ser la mateixa, aquestes es troben disponibles al web d'ArduPilot (17). La primera opció es el programa 3DR Radio Config Tool, es tracta d'un programa lleuger que inclou totes les eines necessàries per a relitzar la configuració. La segona opció es el programa mission planner que, tot i que aporta moltes eines extra, no es faran servir. Queda doncs més recomenat l'ús de la primera eina en l'àmbit d'aquest projecte.

Amb el programa obert, s'ha de seleccionar el port que estigui disponible i posar els baud a 57600, tot seguit es polsa "Load Settings" i s'espera a que es realitzi la obtenció de la configuració actual. A l'esquerra apareixerà tota la informació de l'antena que s'hagi seleccionat en "Port", a la dreta la configuració de l'antena receptora per radio.

L'apartat baud s'ha de canviar a 115 per a fer-la compatible amb el microcontrolador, el Duty Cycle s'ha de posar a 10 per fer la connexió legal, air speed s'ha de posar a 128 per contrarestar el duty cycle tan baix, TX power s'ha de posar a 8 dB (per Espanya) ja que la potència màxima legal es de 10mW. La freqüència de treball minia es de 433050 i la màxima de 434790, finalment el protocol de comunicació Mavlink es deixarà en RawData.

NOTA: El Net ID es farà servir quan hi hagi més antenes configurada en aquests canals

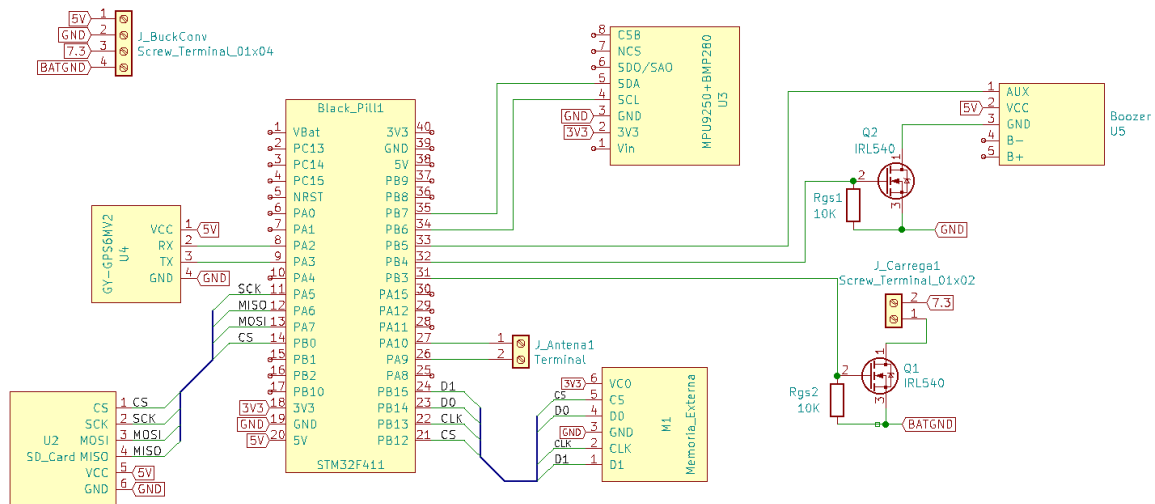
Un cop feta, es molt important polsar el botó copy required to remote ABANS de fer Save Settings. En cas de no fer-se, s'haurà de connectar l'altra antena per cable i realitzar EXACTAMENT la mateixa configuració.

Quant es faci Save Settings aquesta donarà error ja que no haurà pogut validar que la configuració s'hagi aplicat correctament, això es degut al canvi en el baud rate, s'ha de tornar a l'administrador de dispositius i posar-lo a 115200 per a les dues antenes, tot seguit, en el programa de configuració també s'ha de seleccionar el nou baud rate. Si tot ha sortit be, quan es polsi "Load Settings" hauria de carregar la mateixa configuració que s'acaba d'enviar.

8.5 Connexió.

El següent esquema elèctric (Il·lustració 8-11) realitzat amb el software gratuït KiCad, mostra les connexions dels sensors al microcontrolador. De cara al futur és important tenir en compte que tot i que queden molts pins lliures, la majoria dels restants són o connexions SPI o entrades i sortides bàsiques.

També s'ha de tenir en compte que els pins 3v3, GND i 5V es troben connectats internament. Quant al pin VBat, aquest serveix per a mesurar l'estat de la bateria si s'escull alimentar la placa amb bateria, no serveix per a connectar-hi cap font d'alimentació.



Il·lustració 8-11 Connexió de tots els components [Font: Elaboració pròpia]

8.6 El software d'obtenció de dades.

8.6.1 Comunicació amb el GY-91.

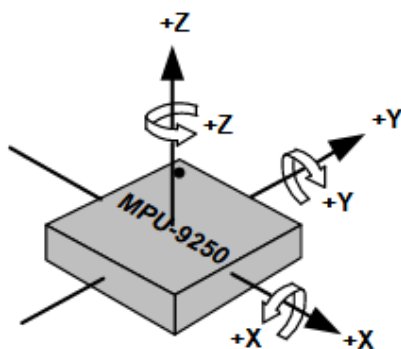
El GY-91 es troba connectat mitjançant I2C, dins però disposa de dos xips i per tant de dues adreces, l'acceleròmetre és en realitat un chip MPU9250 amb adreça (0x71) o un MPU9255 amb adreça (0x73). Tot i tenir noms i adreces diferents, depèn del fabricant i, de cara al projecte, no hi ha cap diferència important més enllà de l'adreça. El baròmetre és un BMP280 de Bosch i apareix amb l'adreça (0x76).

Per a l'obtenció de dades de l'MPU925X s'ha optat per la llibreria creada per Mika Tuupola anomenada micropython-mpu9250, disponible a GitHub.com (18) de la qual s'han de descarregar els arxius mpu6500.py, mpu9250.py i ak8963.py. Aquesta llibreria permet obtenir les dades de l'acceleròmetre, magnetòmetre, el giroscopi i la temperatura interna del xip.

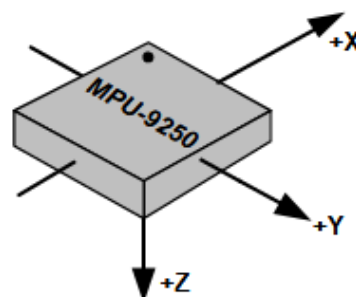
Per al postprocessat d'aquestes dades es fa servir una altra llibreria anomenada ImuMag-Fusion creada per Peter Hinch i disponible a GitHub.com (19) que n'extreu l'orientació i l'AoA, per a poder-ho fer però s'han de reorientar els vectors de la Il·lustració 8-12.

Per a l'obtenció de dades del BMP280 s'ha fet servir la llibreria micropython-bmp280 creada per David Stenwall Wahlund i disponible a GitHub.com (20) de la qual només es fa servir l'arxiu bmps280.py. Amb aquesta llibreria podem obtenir dades de pressió atmosfèrica i, per tant, extreure l'altura

Acceleròmetre i giroscopi (MPU9250)



Magnetòmetre (AK8963)



Il·lustració 8-12 Vectors originals MPU9250 [Font: Elaboració pròpia]

8.6.2 Comunicació amb GY-GPS6MV2.

El mòdul GPS es troba connectat mitjançant UART, als pins USART2 PA2 i PA3. Malauradament aquest no treballa amb baud rates de 115200 i s'ha de configurar a 9600, és per tant una connexió més lenta però tampoc suposa un gran inconvenient.

És important saber que aquest mòdul porta una pila recarregable per al rellotge intern i que dura només unes hores. S'ha de deixar carregar doncs uns minuts cada vegada que es vol fer servir el coet.

Finalment, la cobertura GPS d'aquesta antena no es gaire bona i generalment necessita trobar-se a l'exterior per trobar-ne. Quan això succeeixi s'encendrà un led vermell en el mòdul. En cas contrari la informació serà incompleta.

Per interpretar i simplificar la informació rebuda del GPS, s'ha fet servir la llibreria micropyGPS creada per Michael Calvin McCoy disponible a GitHub.com (21).

Fent servir aquesta llibreria, es pot obtenir informació molt útil com la latitud, longitud i temps real (que serveix per actualitzar el RTC intern de la placa).

8.6.3 Comunicació amb l'adaptador micro-SD.

La connexió a l'adaptador micro-SD es realitza mitjançant protocol SPI en l'SPI1 per als pins A7,A6,A5 i B0. A diferència dels altres mòduls, aquest no requereix l'ús de llibreries externes, ja que ve tot integrat en el firmware de Micropython. El funcionament es força simple, s'assignen els pins en el programa i es "monta" la SD com una nova partició del sistema anomenada "/sd".

S'han realitzat proves amb una SD de 4gb i s'ha determinat que es espai més que suficient.

8.6.4 Funcionament bàsic del programa.

boot.py

L'arxiu boot.py ha d'anar pràcticament buit, dins només s'hi inclouen les llibreries bàsiques inherents a Micropython, és a dir, pyb, machine i math. També es realitza la següent instrucció per a seleccionar el país, pyb.country('ES'). Finalment, s'intenta muntar la targeta micro-SD.

main.py

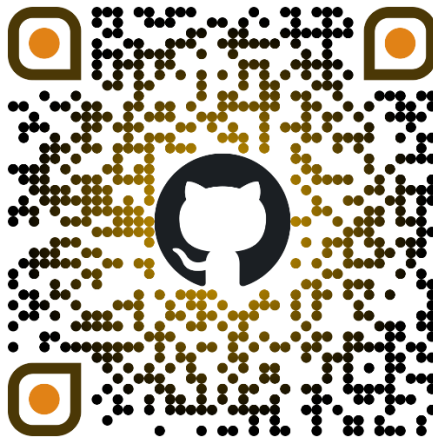
Al main.py primer s'inclouen les llibreries que es fan servir, també s'hi defineixen moltes funcions i classes generals del sistema. De cara a l'usuari però, aquest només haurà de conèixer la funció auto() ja que aquesta s'encarrega d'absolutament tot.

main.auto()

NOTA: És molt recomanable la lectura d'aquest apartat seguint el diagrama de blocs de la Il·lustració 10-12 per a la funció auto i el de la Il·lustració 10-13 per la funció test.

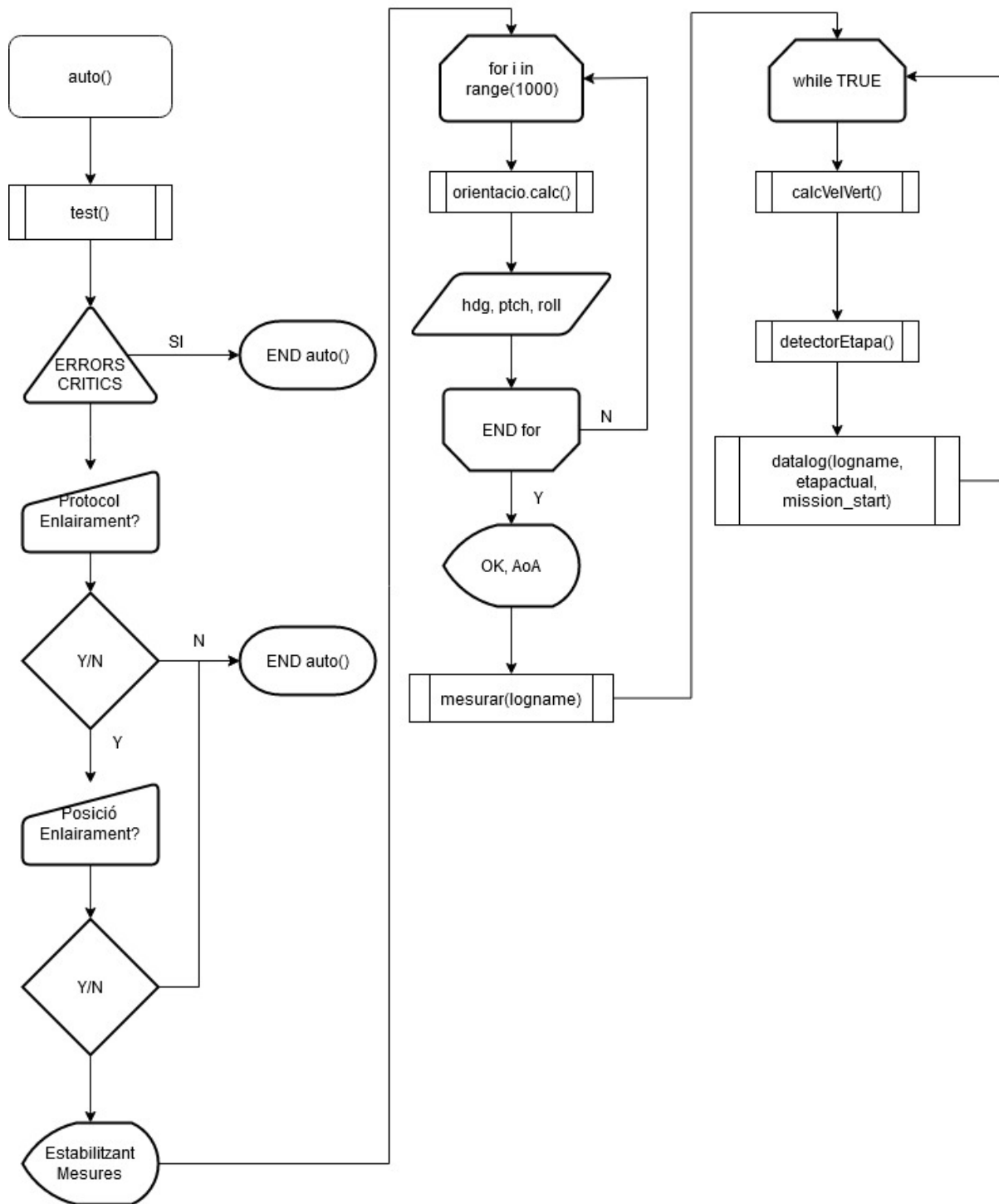
La funció auto primer fa una verificació general del sistema, comprovant que estigui present i "muntada" la targeta micro-SD i que les adreces dels sensors siguin correctes. Això es fa, ja que s'ha notat que sovint no funcionen els sensors i la solució és desconnectar i reconnectar el sistema. La causa d'aquest problema té a veure amb la connexió mitjançant el cable USB, ja que el reinici del microcontrolador quan es connecta per USB el posa en mode "VCP+MSC", és a dir, funciona com un dispositiu d'emmagatzemament, causant tota mena de problemes de direccions. Per evitar-lo, és millor fer servir la placa connectada per bateria i amb l'antena.

Si se supera la verificació general, aquest programa realitza 6 intents de busca de cobertura GPS. Si no ho aconsegueix, es veu un missatge com el de la Il·lustració 11 15, en canvi, si durant algun dels intents ho aconsegueix, se sincronitza l'RTC i permet a l'usuari iniciar el protocol d'enlairament si així ho desitja com a la Il·lustració 11 16. En cas afirmatiu, es prega que es col·loqui el coet en posició d'enlairament (vertical). Procedeix doncs a un calibratge general de les mesures, un cop acabat, es mostra l'AoA i es genera un arxiu al SD amb la data i hora actuals. En aquest arxiu es registren les mesures de temps, etapa del vol, pressió, altitud, velocitat, coordenades i acceleracions. A més, totes les mesures s'envien també al monitor REPL per tal que es puguin veure en directe.

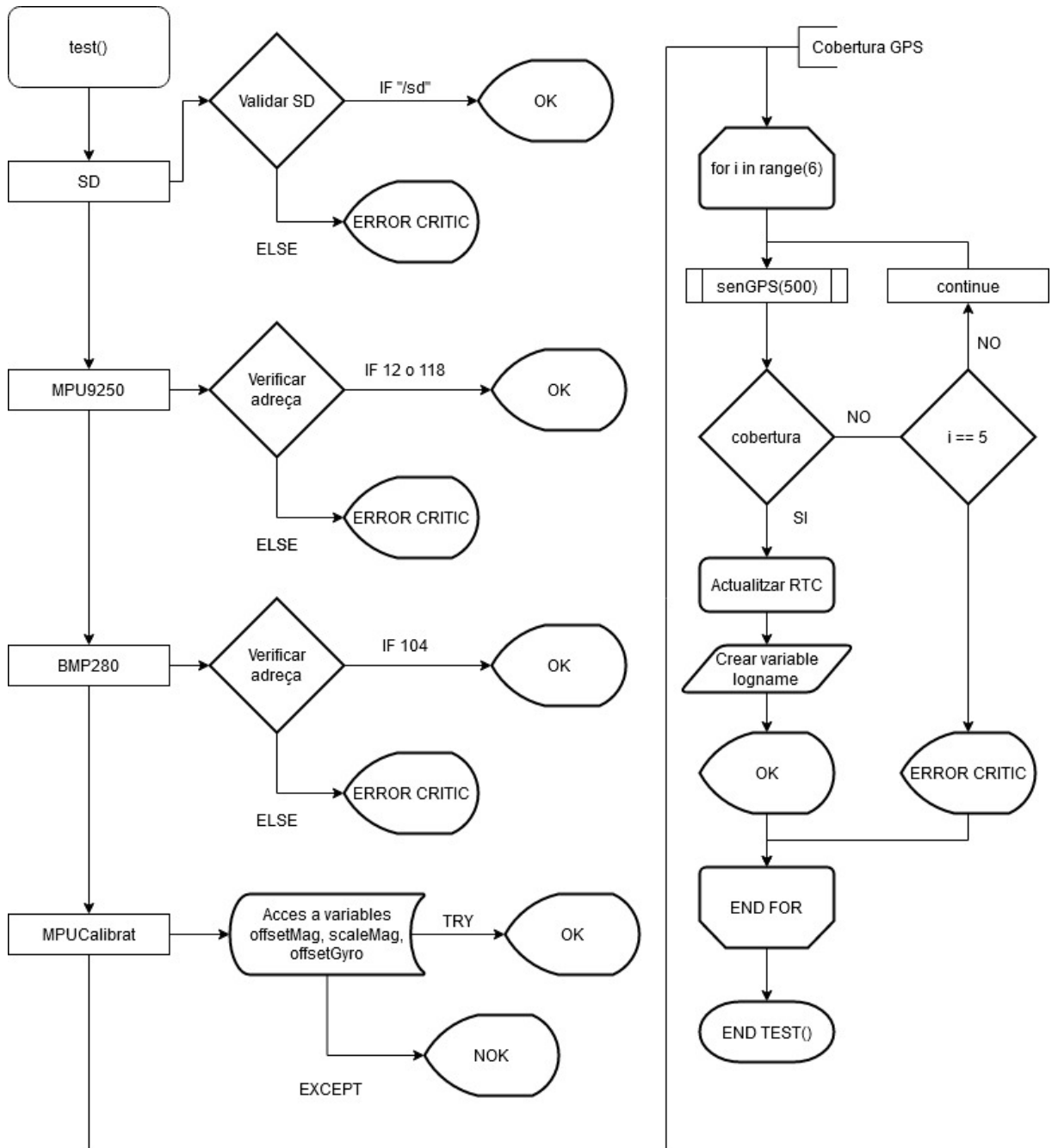


QR 1 al repositori del programa creat (GitHub)

[LINK: https://github.com/markambk/Micropython-RocketLogger](https://github.com/markambk/Micropython-RocketLogger)



Il·lustració 8-13 Diagrama de blocs de la funció auto() [Font: Elaboració pròpia]



Il·lustració 8-14 Diagrama de blocs de la funció test() [Font: Elaboració pròpia]

```

>>> auto()
Iniciant test del sistema

Comprovant sd...OK
Comprovant estat del MPU9250...OK
Comprovant estat del BMP280...OK
Altitud actual: 125.7246
Comprovant calibracio del sensor MPU9250...Offset magnetometre: (-2.751854, 51.65625, -62.70586)
Escala magnetometre: (1.002713, 1.005584, 0.9918089)
Offset giroscopi: (-0.08459246, 0.0783259, -1.415663)
OK
Dades de calibracio trobades, en cas de malfuncionament recalibrar amb calMPU()
Comprovant conexió al sensor GPS...OK
Comprovant cobertura GPS...N-OK
No hi ha cobertura GPS, reintentant...
Comprovant cobertura GPS...N-OK
No hi ha cobertura GPS, reintentant...
Comprovant cobertura GPS...N-OK
No hi ha cobertura GPS, reintentant...
Comprovant cobertura GPS...N-OK
No hi ha cobertura GPS, reintentant...
Comprovant cobertura GPS...N-OK
No hi ha cobertura GPS, reintentant...
Comprovant cobertura GPS...
No s'ha pogut establir cobertura GPS, assegura que el coet es troba a l'exterior i executa test()
Temps de mostreig (uS): 3950

```

Il·lustració 8-15 resposta d'auto() sense GPS [Font: Elaboració pròpia]

```

>>> auto()
Iniciant test del sistema

Comprovant sd...OK
Comprovant estat del MPU9250...OK
Comprovant estat del BMP280...OK
Altitud actual: 114.2345
Comprovant calibracio del sensor MPU9250...Offset magnetometre: (-2.751854, 51.65625, -62.70586)
Escala magnetometre: (1.002713, 1.005584, 0.9918089)
Offset giroscopi: (-0.08459246, 0.0783259, -1.415663)
OK
Dades de calibracio trobades, en cas de malfuncionament recalibrar amb calMPU()
Comprovant conexió al sensor GPS...OK
Comprovant cobertura GPS...OK
Hi ha senyal GPS
S'han detectat 4 satel·lits
Avui hauria de ser (23, 5, 20) i la hora actual hauria de ser 10:12
Les coordenades actuals del coet són: [41, 3 [redacted], 'N'] [2, 2 [redacted], 'E']
Temps de mostreig (uS): 3706
Iniciar protocol d'enlairament? SI(Y) | NO(N): Y
Coloca el coet en posició de enlairament, envia (Y) quan estigui llest, (N) per cancel·lar: Y
Estabilitzant mesures...OK
AoA = 4.321289
16371,Espera,[41 3 [redacted] N],[2 2 [redacted] E],99820.59,124.6559,4.316933,0,0.2947767,9.933543
16609,Espera,[41 3 [redacted] N],[2 2 [redacted] E],99814.21,125.1893,4.311668,0,0.2947767,9.952697

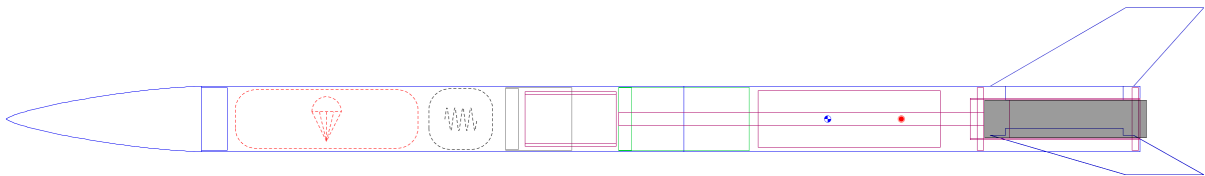
```

Il·lustració 8-16 Resposta d'auto() funcionant [Font: Elaboració pròpia]

9. Especificacions tècniques.

Les especificacions tècniques del projecte s'han decidit mitjançant la unió de les idees inicials i la recerca feta durant l'avantprojecte i la memòria intermèdia. Aquest apartat pretén ser un resum de les especificacions del coet, no l'explicació d'aquests ni de com s'ha arribat al seu disseny final, aquesta informació es troba disponible a l'apartat "projecte" a l'apartat del "Procediment de disseny final del coet.

9.1 Especificacions Físiques Generals.



Il·lustració 9-1 Disseny final ESP TEC [Font: Elaboració pròpia]















LONGITUD:	900 mm	ACCEL. MAX	204 m/s²
DIÀMETRE:	50 mm	MARGE ESTÀTIC:	1.13
VEL. MAX.:	200 m/s	CG:	630 mm
MOTOR:	G76-7G	CP:	687 mm
AP:	713 m		
Ø PARACAIGUDES:	700 mm		
VEL. CAIGUDA:	4.83 m/s		

Taula 9-1 Especificacions Tècniques

Desglossat de peces en detall:

Parts Detail

Sustainer

	Con	ABS (1,08 g/cm ³)	Series Haack	Len: 150 mm	Mass: 50 g
	Tub Superior	Cartón fenólico (0,95 g/cm ³)	Diain 48,8 mm Diaout 50 mm	Len: 370 mm	Mass: 32,7 g
	Shock cord	Niló trenat (2 mm, 1/16 in) (1 g/m)		Len: 1000 mm	Mass: 1 g
	Acoblador	Cartón fenólico (0,95 g/cm ³)	Diain 47,6 mm Diaout 48,8 mm	Len: 100 mm	Mass: 8,63 g
	Base Pisto	ABS (1,08 g/cm ³)	Diaout 47,6 mm	Len: 10 mm	Mass: 19,4 g
	Pistó	Cartón fenólico (0,95 g/cm ³)	Diain 46,6 mm Diaout 47,8 mm	Len: 51 mm	Mass: 10 g
	Part Superior Pisto (Tapa)	ABS (1,08 g/cm ³)	Diaout 46,6 mm	Len: 10 mm	Mass: 0 g
	Paracaigudes	Ripstop nylon (87 g/m ²)	Diaout 870 mm	Len: 140 mm	Mass: 36 g
	Shroud Lines	Cordón elástico (aprox. 2mm, 1/16 in) (1,8 g/m)	Lines: 6	Len: 260 mm	
	Cambra	Cartó fenólic (0,95 g/cm ³)	Diain 38 mm Diaout 42 mm	Len: 70 mm	Mass: 16,7 g
	Tub Inferior	Cartón (0,88 g/cm ³)	Diain 48,8 mm Diaout 50 mm	Len: 350 mm	Mass: 22,2 g
	E-Bay	ABS (1,08 g/cm ³)	Diain 42 mm Diaout 43 mm	Len: 140 mm	Mass: 200 g
	Trapezoidal fin set (3)	Cartón fenólico (0,95 g/cm ³)	Thick: 3 mm		Mass: 51,2 g
	Engine block	Cartón fenólico (0,95 g/cm ³)	Diain 29,2 mm Diaout 32 mm	Len: 130 mm	Mass: 91 g
	Centering ring	ABS (1,08 g/cm ³)	Diain 32 mm Diaout 48 mm	Len: 5 mm	Mass: 5,48 g
	Centering ring	ABS (1,08 g/cm ³)	Diain 32 mm Diaout 48 mm	Len: 5 mm	Mass: 5,48 g
	Motor	Cartón (0,88 g/cm ³)	Diain 28 mm Diaout 29 mm	Len: 100 mm	Mass: 3,04 g
	Inner Tube	Cartón (0,88 g/cm ³)	Diain 9 mm Diaout 10 mm	Len: 280 mm	Mass: 2,84 g
	Subjecció de les aletes		Diaout 6,5 mm		Mass: 0 g
	Subjecció de les aletes		Diaout 6,5 mm		Mass: 0 g
	Subjecció de les aletes		Diaout 6,5 mm		Mass: 0 g

Taula 9-2 Desglossat de peces

9.2 Especificacions Electròniques.

PCB a mesura

Microcontrolador STM32F411:

- Cortex-M4 treballant a 100 MHz.
- Firmware per a programació Micropython
- Unitat de Punt Flotant.
- UART, I2C, SPI.

Antena 3DR:

- 433 MHz (Europa) / 915 MHz (USA).
- Comunicació UART (FTDI integrat)..
- Rang de 3 km en camp obert, 300m en bosc

Sensors:

- MPU9250 (acceleròmetre, giroscopi, magnetòmetre).
- BMP280 (baròmetre).
- NEO-6M (GPS).

Memòria:

- Memòria flash interna EEPROM SPI 32/64/128Mbit.
- Micro-SD.

Velocitat de comunicacions:

- **115200 bauds:** UART 1.
- **9500 bauds:** UART 2.

Consum:

- **200 mA** durant el funcionament de la funció auto()

Bateria:

- Lipo **1300 mAh** 7.4V 20C
- **6h** de funcionament carregada al **100%** (no recomanat per la salut de la bateria)
- **3.5h** de funcionament carregada al **60%** (funcionament preferible per la bateria)

Convertidor de Buck (DC-DC step down):

- Convertidor de Buck LM2596 ajustat a **5V**

10. Anàlisi de viabilitat mediambiental.

En l'Estudi d'Impacte Ambiental disponible a l'Annex V, s'han considerat diferents aspectes que tenen a veure amb els factors ambientals impactants i les accions pròpies, en el nostre cas, de la construcció i posada en marxa del coet. Es recullen a continuació, en forma de taula, les principals accions i factors que s'hauran de prendre en consideració de l'estudi de detall.

Accions impactants

Acciones Impactants		Observacions
Fase de Construcció	Tall a laser i consum de maquinaria	La contaminació del procés de producció no es exagerada, el procés més impactant es el tall a laser ja que produeix gasos i partícules que s'expandeixen ràpidament. Com el tall serà d'un tipus de cartró i fusta, aquests no seran gaire nocius. S'han de consultar les emissions per a cada material a utilitzar, a més, les partícules han de ser aspirades i filtrades.
	Transport de matèria prima	
	Il·luminació	
Fase de Funcionament	Ignició del coet	Durant la ignició i l'enlairament hi ha risc de incendi i s'emeten fums i gasos nocius. Es important respectar les normes Tripoli per assegurar una activitat segura. En el cas del descens, si el paracaigudes falla, caurà a velocitat terminal impactant violentament contra el terra posant en perill les persones, la fauna i la flora així com estructures.
	Descens	
Fase de recuperació i reutilització	Llençar el motor utilitzat	Un cop gastat el motor hi quedaran residus, per als motors de pólvora negra es recomana rentar-los amb aigua i reciclar-los com paper.

Taula 10-1 Accions impactants

Factors ambientals impactats

	Factor Ambiental	Impacte sobre ...
Medi Natural	Atmosfera	Emissió de gasos i partícules
	Sòl	Sedimentació
	Aigua	Es generen aigües residuals al rentar el motor
	Flora	-
	Fauna	Exposició de curta durada a llum i soroll forts
	Medi perceptual	Exposició de curta durada a llum i soroll forts
Medi Socioeconòmic	Usos del territori	-
	Culturals	-
	Infraestructura	Perill de caiguda del coet si el paracaigudes falla
	Humans	Perill de caiguda del coet si el paracaigudes falla
	Economia i població	Perill de caiguda del coet si el paracaigudes falla

Taula 10-2 Factors ambientals impactats

11. Planificació i tasques del projecte.

S'ha creat un document amb el MS Project per organitzar les tasques i estimar una data de finalització del projecte el 3 de juliol de 2020. Les activitats definides són:

Task Name	Duration
Electrònica	
Disseny electrònic	18 hrs
Comanda de components electrònics	4 hrs
Comanda de memòria SPI & SD (AFECTACIONS COVID-19)	6 hrs
Aprenentatge KiCad	6 hrs
Disseny del gerber	16 hrs
Actualització disseny PCB	7 hrs
Fabricació del PCB	3 hrs
Soldadura dels components	8 hrs?
Soldadura de la memòria	5 hrs
Soldadura del PCB	6 hrs
Comanda PCB foradada	1 hr
Actualització disseny PCB	7 hrs
Soldadura PCB	7 hrs

Taula 11-1 Activitats Electrònica

Task Name	Duration
Software	
Instal·lació d'ubuntu	3 hrs
Instal·lació de Micropython al microcontrolador	12 hrs
Instal·lació de drivers & primer accés a REPL	5 hrs
Definir les funcions del software	3 hrs
Diagrama de blocs del codi	6 hrs
Reinstal·lació del Firmware en mode SPI	8 hrs
Roadmap	
Identificació i estudi dels diferents protocols (UART, I2C, SPI)	7 hrs
Configuració de l'antena HC-12	3 hrs
Obtenció de connexió REPL mitjançant l'antena	3 hrs
Encendre i apagar un LED per practicar	6 hrs
Obtenció de dades de pressió atmosfèrica	3 hrs
Obtenció de l'altura a partir de la pressió	2 hrs
Obtenció de dades de orientació	6 hrs
Guardar informació rellevant en taules a la SD sense risc	3 hrs
Obtenir dades GPS	6 hrs
Programació principal	23 hrs
Ensamblar les funcions	10 hrs
Ensamblatge final de la badia electronica	2 hrs

Taula 11-2 Activitats de software i programació

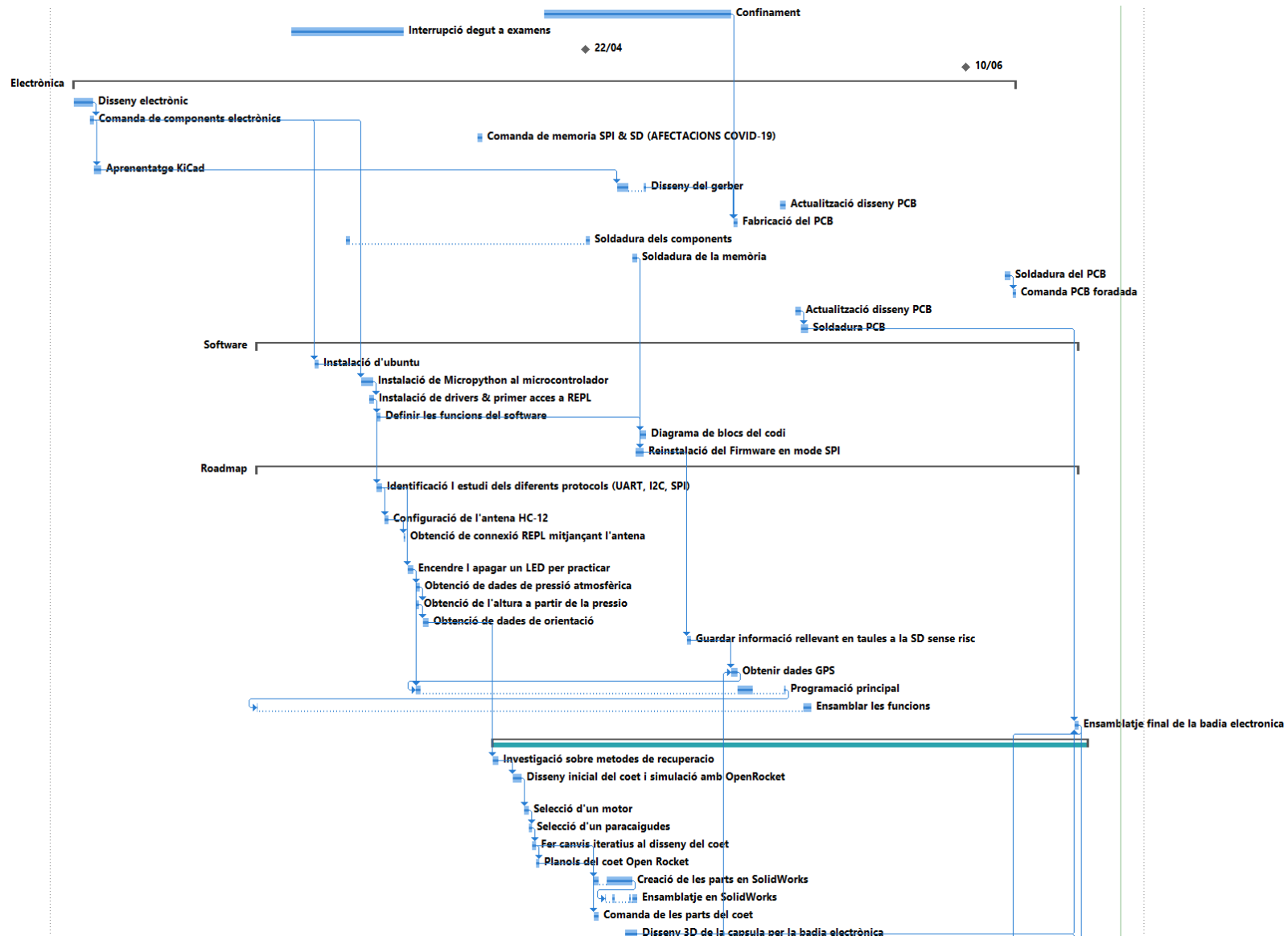
Task Name	Duration
Mecànica	
Investigació sobre metodes de recuperacio	5 hrs
Disseny inicial del coet i simulació amb OpenRocket	12 hrs
Selecció d'un motor	4 hrs
Selecció d'un paracaigudes	4 hrs
Fer canvis iteratius al disseny del coet	3 hrs
Planols del coet Open Rocket	5 hrs
Creació de les parts en SolidWorks	30 hrs
Ensamblatge en SolidWorks	14.33 hrs
Comanda de les parts del coet	4 hrs
Disseny 3D de la capsula per la badia electrònica	12 hrs
Tallar a mida el cos del coet	5 hrs
Disseny 3D subjeccions per motor	6 hrs
Disseny 3D del con	8 hrs?
Impressió 3D con personalitzat	1 hr
Impressió 3D de subjeccions motor	1 hr
Disseny 3D de les aletes	3 hrs
Disseny 3D dels retenidors d'aletes	4 hrs
Disseny 3D de totes les peces restants + Ensamblatge	8 hrs?
Simulacions aerodinàmiques	7 hrs
Impressió 3D aletes i retenidors	12 hrs
Ensamblatge del coet	35 hrs
Ensamblatge Final del coet	15 hrs

Taula 11-3 Activitats Mecànica

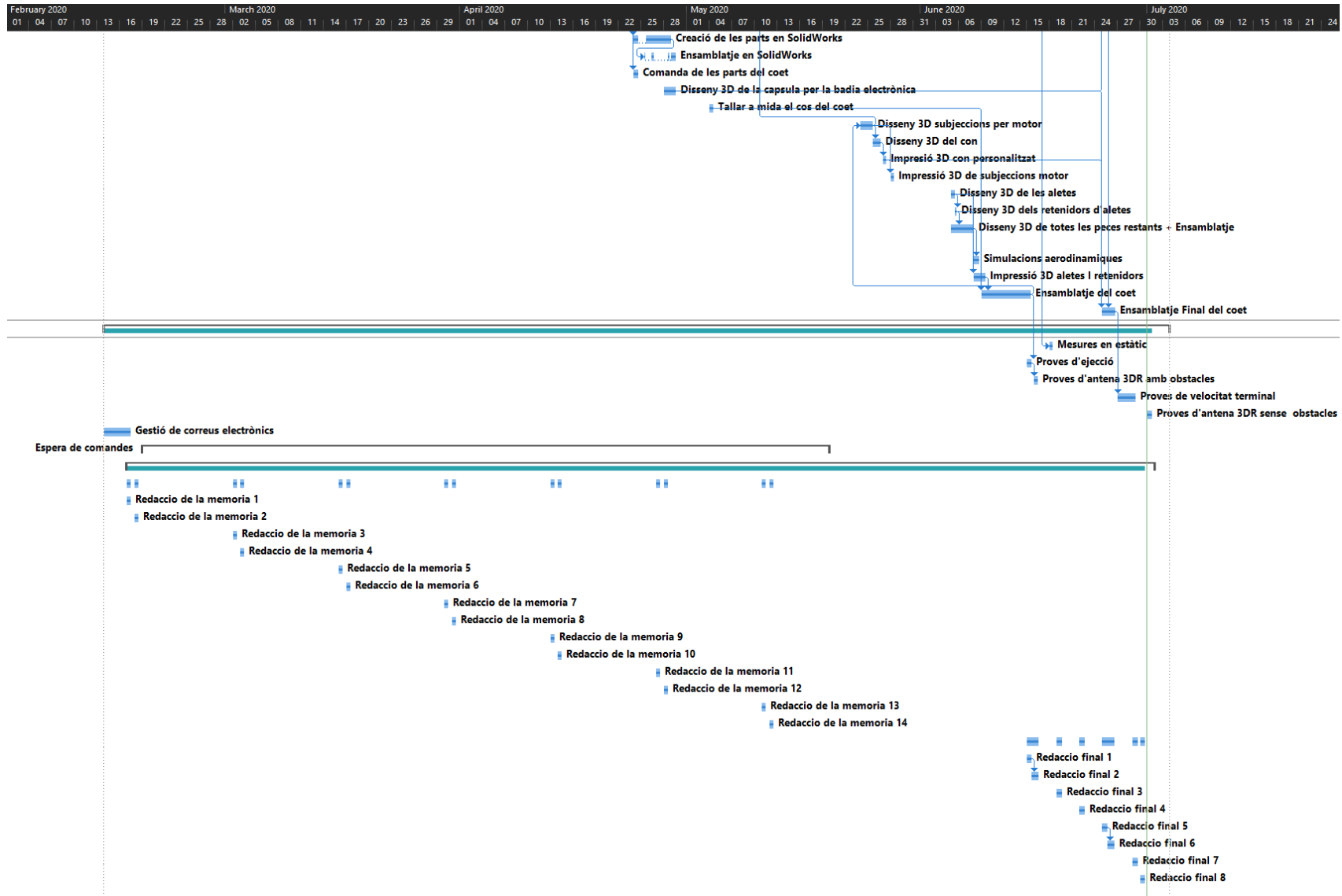
Task Name	Duration
Proves & Altres	
Mesures en estàtic	2 hrs
Proves d'ejecció	6 hrs
Proves d'antena 3DR amb obstacles	2 hrs
Proves de velocitat terminal	2 hrs
Proves d'antena 3DR sense obstacles	4 hrs
Gestió de correus electrònics	11 hrs

Taula 11-4 Temps d'espera de comandes

S'ha optat per afegir un sistema de tasques repetitives de redacció de memòria, ja que és un procés que va intercalant amb la feina normal. Està dividit en dues fases, redacció lleugera fins al dia d'entrega de la memòria intermèdia i redacció més constant a partir del dia d'entrega d'aquesta.



Il·lustració 11-1 Diagrama de gannt part superior [Font: Elaboració pròpia]



Il·lustració 11-2 Diagrama de gannt part inferior [Font: Elaboració pròpia]

12. Proves de validació.

S'han realitzat un seguit de proves per comprovar que les especificacions del coet s'atenen a la realitat. S'ha verificat que l'antena té potència suficient, que la recollida de dades funciona correctament, que la velocitat terminal de descens amb paracaigudes és segura i que el sistema d'alliberament de paracaigudes és fiable.

12.1 Presa de mesures en estàtic.

Per tal de poder fer més proves, s'ha de veure l'error que produeix cada sensor, en estàtic. Per a poder-ho fer, s'ha executat l'ordre auto() amb el coet completament quiet i ben orientat. De la taula de resultats s'han estudiat els primers 50 valors (taula disponible a l'Annex IV), amb aquests valors s'ha calculat la mitjana i la desviació màxima.

Les conclusions són les següents:

TIPUS DE MESURA	VARIACIÓ ¹
Pressió	± 10 Pa
Altitud	± 0.57 m
Velocitat Vertical ²	± 4.26 m/s
Acceleració Vertical	± 0.30 m/s ²
Angle d'Atac (AoA)	± 0.42 °

Taula 12-1 Variació de les mesures

La mesura menys fiable doncs és la velocitat vertical, hi ha dues causes, el primer motiu és que el càlcul de la velocitat vertical depèn molt de la velocitat del microprocessador i el microSD, ja que en l'instant en el qual es pren la mesura de pressió atmosfèrica s'ha d'enregistrar l'instant de temps, no obstant això, sempre hi ha una petita diferència de temps que no sempre és la mateixa, ja que es realitzen càlculs per mig. L'altre motiu és la mateixa variació de les mesures de pressió (causades pel sensor) i l'error en calcular l'altitud. En operar amb totes aquestes variables doncs, és normal trobar un error força significat en la velocitat vertical, no obstant això, en tractar-se d'una mesura purament orientativa i que no té impacte en el funcionament del programa, no es pot considerar un gran inconvenient.

¹ Valors arrodonits segons la seva utilitat i necessitat de precisió

² La velocitat vertical es calcula a partir de l'altitud

12.2 Prova d'ejecció del sistema de recuperació.

La prova d'ejecció s'ha realitzat a una distància prudencial, posant càmeres en posicions fixes i activant la càrrega manualment. La detonació ha alliberat els gasos que, expandint-se ràpidament, han ejectat la part superior del coet.

Queda verificat doncs que és possible la utilització d'aquest sistema d'ejecció.



Il·lustració 12-1 Ejecció [Font: Elaboració pròpia]



QR 2 al video (YouTube)

[LINK: https://youtu.be/bQAzw3Vt7-Q](https://youtu.be/bQAzw3Vt7-Q)

12.3 Aproximació de mesura de velocitat terminal.

S'ha deixat caure el coet al jardí des d'una altura de 7m amb el paracaigudes obert i s'ha calculat la velocitat de caiguda. Gràcies a l'altíssim coeficient d'arrossegament (Ca), aquesta alçada hauria de donar una estimació suficient bona de la velocitat terminal.

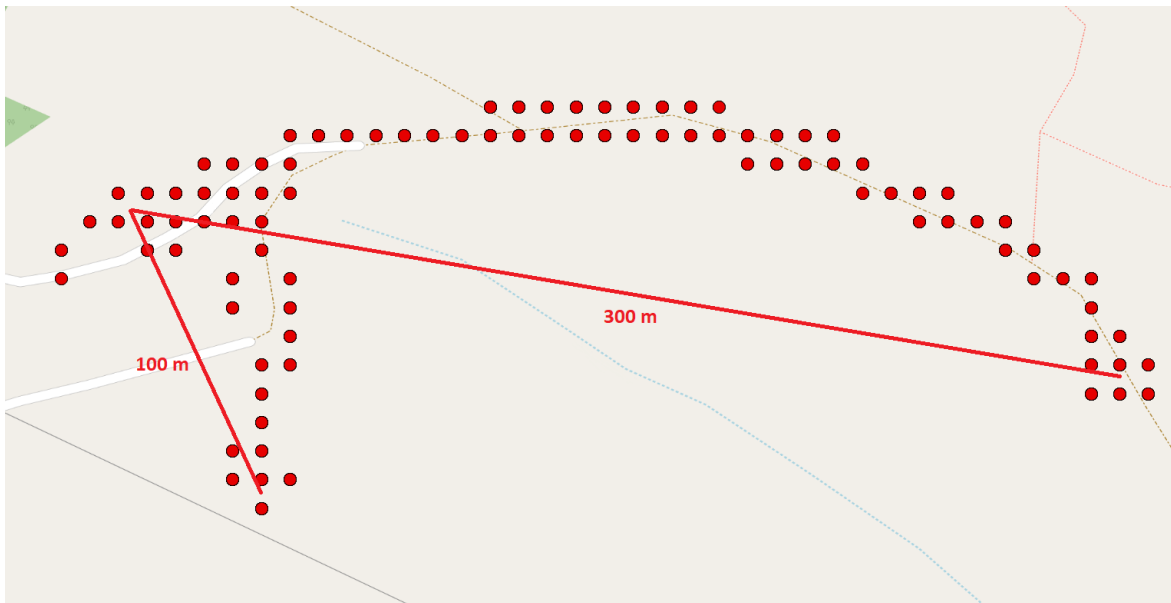
Instant (ms)	Velocitat Vertical (m/s)	Altitud (m)
82340	1.245097	211.1207
82639	4.81461	208.6311
83146	10.07882	206.6128
83393	3.801034	206.5827
83695	0	207.0237
83966	1.814619	207.0014
84211	0	206.4858
84483	1.88833	205.6388

Taula 12-2 Velocitat Terminal

Tenint en compte la variació de la velocitat vertical calculada a l'apartat 12.1 (± 4.26 m/s), s'obté que la velocitat terminal és de $2,96 \pm 4,26$ m/s, tot i no ser gaire precís, el coet ha acabat en perfectes condicions i es pot dir que el valor és molt proper al desitjat a l'apartat 6.1.5 (entre 3 i 4,5 m/s). A més, es tracta d'un valor possible si es té en compte que a les simulacions d'Open Rocket es calcula una caiguda de 4,84 m/s. Es pot afirmar doncs que el paracaigudes és adequat per a la tasca, tanmateix, pot ser més segur posar un paracaigudes una mica més gran.

12.4 Abast de l'antena amb obstacles.

Mantenint l'antena receptora en un lloc estàtic, s'ha caminat amb l'antena emissora i el microcontrolador en mode auto() i enregistrant dades a la targeta microSD. S'ha descobert que un edifici redueix l'abast a 100 m i un bosc de pins a 300 m. Es veu doncs l'importància de realitzar els llançaments en una localització lliure d'obstacles.



Il·lustració 12-2 Abast de l'antena amb obstacles [Font: Elaboració pròpia]

12.5 Abast de l'antena sense obstacles

S'ha realitzat la mateixa prova que a l'apartat anterior però a la platja de Mataró. Mantenint l'antena receptora en un lloc estàtic, s'ha caminat amb l'antena emissora i el microcontrolador en mode auto() i enregistrant dades a la targeta microSD. S'ha descobert que sense obstacles s'ha aconseguit cobertura a uns 800m (780m). Els primers 600m hi ha hagut cobertura sense cap problema, per arribar als 800 però s'ha hagut de pujar a un lloc elevat. No s'ha pogut continuar a més distància perquè l'espigó de la platja feia de barrera, no obstant això, no hi ha cap dubte però del fet que és possible comunicar-se amb el coet durant el vol.



Il·lustració 12-3 Abast de l'antena sense obstacles [Font: Elaboració pròpia]

13. Conclusions finals, entrebancs i futures línies de treball.

13.1 Conclusió i entrebancs.

Es tracta d'un projecte complicat que pot treure a qualsevol estudiant d'enginyeria fora de la seva zona de confort perquè té moltes ramificacions d'enginyeries i ciències diferents que s'han d'estudiar.

S'han requerit coneixements d'electrònica per al disseny del circuit i la PCB, per tal poder-ho fer s'ha hagut d'aprendre a fer servir el programa KiCad, així com a dissenyar els components dins d'aquest (tant els "footprints" per la PCB com els "símbols" per als esquemes)

Un altre coneixement important ha estat la programació de microcontroladors i tots els protocols de comunicacions involucrats. Una opció ha estat fer-ho amb Arduino, ja que hi ha més llibreries i la programació sol ser força més fàcil, tanmateix, es va decidir fer-ho amb Micropython, ja que és molt més professional, eficient i no requereix ser compilat (permetent l'edició del codi des de qualsevol ordinador sense requerir programes especials).

Quant a mecànica i aerodinàmica, s'ha hagut de dissenyar el cos complet del coet en OpenRocket i posteriorment cada peça individual en Solidworks, això ha requerit un gran esforç per trobar una bona solució al problema de l'apertura automàtica del paracaigudes. També s'ha hagut de fer un complicat disseny per a la badia electrònica, ja que hi ha molts components.

Durant el desenvolupament del projecte i especialment per la construcció d'un prototip s'han trobat moltes dificultats. El entrebanc més gros ha estat la epidèmia de la Covid-19, ja que ha retardat enormement l'arribada de les peces i components. Un exemple són les recàrregues del motor, que no han arribat, ja que s'han de fabricar i importar dels Estats Units. Altres components que no han arribat són els transistors i el boozzer.

Un altre problema ha estat l'abast de l'antena HC-12, que ha estat molt inferior a l'esperat. Aquest inconvenient ha obligat a comprar una antena força més potent i en conseqüència força més cara. No es pot negar però que la qualitat de la nova és molt superior.

També hi ha hagut entrebancs amb el mòdul GPS, ja que la lectura que s'obtenia per UART donava la impressió de què no funcionava correctament. Per aquest motiu es va haver de comprar un segon mòdul per Amazon a un preu molt superior, només per a descobrir que el senyal era exactament el mateix. Al final el problema va resultar ser que l'antena té una cobertura especialment dèbil i aquesta no funciona en espais tancats.

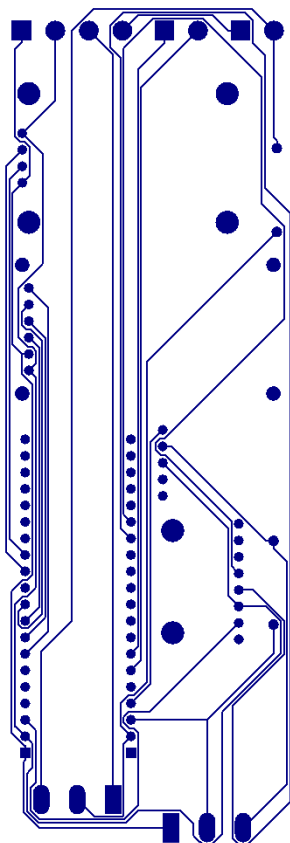
Un dels majors problemes del prototip ha estat la PCB que anava a ser fabricada amb la CNC de la universitat.

En primer lloc l'entrega d'aquesta havia d'esperar que s'acabés el confinament. Fins que arribés el moment s'hauria de fer servir una protoboard.

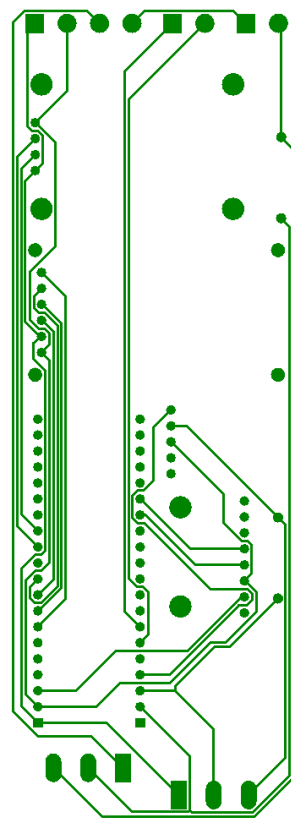
En segon lloc, va resultar que fer una PCB amb CNC és molt més fàcil si es fa amb les pistes a una sola cara perquè és molt complicat donar-li la volta a la planxa de coure amb precisió. Així doncs, es va fer el primer disseny amb totes les pistes a una cara, augmentant exponencialment la dificultat del disseny. El que no es va preveure però és que les pistes eren massa primes per aquest mètode de fabricació. El segon intent doncs van ser fer les pistes més grans, però no va servir de gaire, ja que l'espai és escàs i només van poder augmentar de 0.1 mm a 0.4 mm.

Arribats aquest punt es va decidir que el millor seria intentar fer la PCB a doble cara, és va fer un redisseny de les pistes i en imprimir-lo, aparentment, va ser un èxit. No va ser però fins a l'hora de soldar el circuit que es va descobrir que els pads eren massa petits i que inclús feien curtcircuits entre ells. Òbviament una possible solució seria fer-los més grans però la distància entre ells ja era massa petita. Es va tenir, doncs, de treure manualment cada pad que no fos necessari i soldar directament amb les pistes, malauradament aquestes no tenen suficient força i van acabar desenganxant-se de la baquelita. Per aquest motiu al final es va optar per fer servir una PCB foradada i fer totes les connexions manualment, ja que es tracta d'un prototip. El disseny final però està pensat per fabricar-se com una PCB normal i no hauria de tenir cap problema.

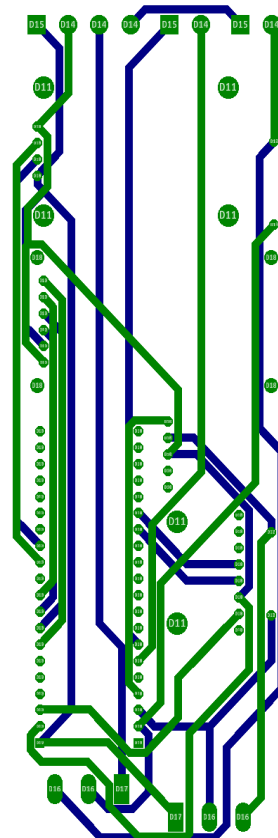
En conclusió doncs, tot i haver passat per molts entrebancs i la dificultat del projecte, s'ha aconseguit fer un prototip que tot i no haver-se pogut provar, supera totes les proves realitzades.



Il·lustració 13-1 Gerber 1
[Font: Elaboració pròpia]



Il·lustració 13-2 Gerber 2
[Font: Elaboració pròpia]



Il·lustració 13-3 Gerber 3
[Font: Elaboració pròpia]

13.2 Futures línies de treball.

Quant a futures línies de treball, hi ha varies opcions:

Es podria millorar el software i la PCB, per fer aquest sistema més còmode de fer servir, aquestes millores podrien ser per exemple:

- Fer que el coet es pugui comunicar amb una aplicació mòbil.
- Afegir opcions per models coet de dues o més fases.
- Generar gràfics en directe i superposar-los a gràfics de comportament nominal.

Es pot fabricar un coet de més potència i amb un gruix més gran, que permeti col·locar més motors en configuracions dobles o fins i tot triples. També es podria modificar el disseny per afegir correcció de direcció activa per mitjà de fer pivotar el motor.

Es podria fer un projecte sencer dedicat a crear un circuit integrat i programable amb tots els components integrats. Això reduiria dramàticament la mida del circuit i la necessitat d'importar tants components per separat.

Finalment, s'hi podria afegir tot un sistema d'il·luminació exterior del coet per a fer-lo més fàcil de trobar.

14. Referències.

1. **Múltiples.** Cohete. *Wikipedia*. [En línia] 2 / 12 / 2019. [Data: 16 / 1 / 2020.] <https://es.wikipedia.org/wiki/Cohete>.
2. —. William Hale (British Inventor). *Wikipedia*. [En línia] 7 / 1 / 2020. [Data: 16 / 1 / 2020.] [https://en.wikipedia.org/wiki/William_Hale_\(British_inventor\)](https://en.wikipedia.org/wiki/William_Hale_(British_inventor)).
3. **TRÍPOLI ASS. INC.** Normas Tripoli. *Tripoli-Spain*. [En línia] 4 / 2010. [Data: 16 / 1 / 2020.] <http://www.tripoli-spain.org/tripoli/MIWEB/NORMASTRIPOLI.pdf>.
4. **Barrowman, James i Judith.** The theoretical prediction of the center of pressure. [En línia] 1966. [Data: 16 / 1 / 2020.] https://www.apogeerockets.com/downloads/barrowman_report.pdf.
5. **RFAE.** Reglamento RFAE Modelismo Espacial. *rfae*. [En línia] 2014. [Data: 28 / 1 / 2020.] http://aeromodelismo.rfae.es/images/CTNA/Reglamentos_CTNA/Reglamento%20RFAE%20Modelismo%20Espacial-2014.pdf.
6. **Spain Rocketry.** *Spain Rocketry*. [En línia] [Data: 23 / 4 / 2020.] <http://www.tripoli-spain.org/tripoli/MIWEB/index.html>.
7. **Benson, Tom.** Center of Gravity. *NASA*. [En línia] 12 / 6 / 2014. [Data: 18 / 1 / 2020.] <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/rocket/cg.html>.
8. —. Center of pressure. *NASA*. [En línia] 6 / 12 / 2014. [Data: 21 / 1 / 2020.] <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/rocket/cp.html>.
9. —. Rocket Stability Condition. *NASA*. [En línia] 12 / 6 / 2014. [Data: 21 / 1 / 2020.] <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/rocket/rktstabc.html>.
10. —. Model Rocket Engine Designation. *NASA*. [En línia] 12 / 6 / 2014. [Data: 27 / 1 / 2020.] <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/rocket/rktenglab.html>.
11. **Sr., Gary A. Crowell.** The descriptive geometry of nose cones. *usp.br*. [En línia] 1996. [Data: 22 / 1 / 2020.]
12. **Múltiples.** Nose Cone Design. *Wikipedia*. [En línia] 19 / 1 / 2020. [Data: 22 / 1 / 2020.] https://en.wikipedia.org/wiki/Nose_cone_design.
13. **Ayşenur Pektaş , et al.** Effects of Different Fin Shapes on Apogee and Stability of Model Rockets. *researchgate.net*. [En línia] 6 / 2019. [Data: 23 / 1 / 2020.] https://www.researchgate.net/publication/334631989_Effects_of_Different_Fin_Shapes_on_Apogee_and_Stability_of_Model_Rockets.
14. **Milligan, Tim Van.** What is the best fin shape for a model rocket. *Peak Of Flight*. 2017, 442.
15. **ArduPilot Dev Team.** Telemetry Radio Regional Regulations. *ardupilot*. [En línia] 21 / 5 / 2020. [Data: 22 / 5 / 2020.] <https://ardupilot.org/copter/docs/common-telemetry-radio-regional-regulations.html#common-telemetry-radio-regional-regulations>.

16. **Rooze, Robert.** HC-12-config. *GitHub*. [En línia] 26 / 7 / 2016. [Data: 15 / 3 / 2020.] <https://github.com/robert-rozee/HC-12-config>.
17. **Team, ArduPilot Dev.** ArduPilot Software. *ArduPilot*. [En línia] ArduPilot. [Data: 23 / 5 / 2020.] <http://www.ardupilot.co.uk/ardupilot-software.html#>.
18. **Tuupola, Mika.** micropython-mpu9250. *GitHub.com*. [En línia] 22 / 3 / 2020. [Data: 6 / 4 / 2020.] <https://github.com/tuupola/micropython-mpu9250>.
19. **Hinch, Peter.** ImuMag-Fusion. *GitHub.com*. [En línia] 7 / 11 / 2017. [Data: 15 / 5 / 2020.] <https://github.com/wystephen/ImuMag-fusion>.
20. **Wahlund, David Stenwall.** micropython-bmp280. *GitHub.com*. [En línia] 12 / 4 / 2020. [Data: 12 / 4 / 2020.] <https://github.com/dafvid/micropython-bmp280/blob/master/bmp280.py>.
21. **McCoy, Michael Calvin.** micropy GPS. *GitHub.com*. [En línia] 9 / 1 / 2020. [Data: 8 / 5 / 2020.] <https://github.com/inmcm/micropyGPS>.
22. **Múltiples.** Spin-Stabilisation. *Wikipedia*. [En línia] 7 / 1 / 2020. [Data: 16 / 1 / 2020.] <https://en.wikipedia.org/wiki/Spin-stabilisation>.
23. —. Carrera Espacial. *Wikipedia*. [En línia] 15 / 1 / 2020. [Data: 16 / 1 / 2020.] https://es.wikipedia.org/wiki/Carrera_espacial.
24. **Andrés, Jesús Manuel Recuenco.** Nova L2. *Tripoli Spain*. [En línia] 2010. [Data: 16 / 1 / 2020.] http://www.tripoli-spain.org/tripoli/experiencias/NOVA-L2_esp.pdf.
25. **Apogee Components.** Selecting Rocket Motors: A step-by-step procedure. *Apogee rockets*. [En línia] [Data: 24 / 1 / 2020.] https://www.apogeerockets.com/Rocket_Books_Videos/Pamphlets_Reports/Tech_Pub_28.
26. **Quest Aerospace.** Apogee Rockets. [En línia] 5 / Novembre / 2009. [Data: 12 / 2 / 2020.] https://www.apogeerockets.com/downloads/MSDS/Quest/MSDS_Quest_Model_Rocket_Motor.pdf.
27. **micropython.org.** Micropython . *Micropython*. [En línia] [Data: 10 / 4 / 2020.] <https://micropython.org/>.