



Escola Tècnica Superior d'Enginyeries
Industrial i Aeronàutica de Terrassa

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Titulació:

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Alumne:

Joaquim Lobo Besora

Títol TFG:

Projecte d'una planta experimental d'assaig per UAVs

Director/a del TFG:

David González Díez

Convocatòria de lliurament del TFG:

Juny 2016

Contingut d'aquest volum: **MEMÒRIA**



Escola Tècnica Superior d'Enginyeries
Industrial i Aeronàutica de Terrassa

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Projecte d'una planta experimental d'assaig per UAVs

Memòria

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria
Industrial i Aeronàutica
de Terrassa

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Autor: **Joaquim Lobo Besora**

Director del TFG: **David González Díez**

Juny 2016

Resum

Aquest projecte tracta sobre el disseny i la construcció d'una planta experimental d'assaig per vehicles aeris no tripulats.

Aquesta memòria es divideix en quatre blocs principals:

El primer bloc es centra en la part mecànica del projecte, on es detalla el disseny, els materials seleccionats i la funcionalitat de la planta experimental.

El segon bloc es centra en l'electrònica, on es detallen els principals components electrònics utilitzats i la raó del seu ús. Aquests components són: el microcontrolador, els motors, les hèlixs, el controlador electrònic de velocitat, la bateria, el carregador de bateria i el sensor.

El tercer bloc es centra en el software creat, en altres paraules, el disseny d'algoritmes de control necessaris per controlar la posició angular de l'UAV.

El quart apartat consisteix en la realització de proves experimentals, modificant diversos paràmetres del software per tal d'obtenir el comportament òptim de la planta.

Abstract

This project is about the design and construction of a pilot plant for testing UAVs.

This report is divided into four main sections:

The first section is focused on the mechanical part of the project, detailing the design, selected materials and the functionality of the pilot plant.

The second section is focused on the electronics, detailing the main electronic components used and the reason for their use. These components are: the microcontroller, the engines, the propeller, the electronic speed controller, the battery, the battery charger and the sensor.

The third section is focused on the software made, in other words, the design of control algorithms needed to control the angular position of the UAV.

The fourth section consists in the implementation of experimental tests, modifying several parameters in order to obtain the optimal behavior of the plant.

Agraïments

Al David González Díez, director d'aquest Treball de Fi de Grau. Per totes les hores dedicades a resoldre dubtes i problemes que han sorgit durant el desenvolupament del treball.

A la meva família per tots els ànims i suport que m'han donat durant aquests últims mesos de grau.

Índex

1 Introducció.....	14
1.1 Objecte	14
1.2 Abast.....	14
1.3 Justificació	14
1.4 Especificacions	14
2 Disseny estructural de la planta experimental.....	15
2.1 Fonaments del disseny estructural	15
2.2 Selecció dels materials	15
2.3 Característiques bàsiques de l'estructura.....	18
2.4 Estructura final	19
2.4.1 Part fixa.....	20
2.4.1.1 Base.....	21
2.4.1.2 Barres d'acer principals	21
2.4.1.3 Suport inferior	22
2.4.1.4 Suport vertical.....	23
2.4.1.5 Suport superior.....	23
2.4.1.6 Suport dels cables.....	24
2.4.1.7 Suport del microcontrolador	24
2.4.1.8 Suport de la bateria	25
2.4.2 Part mòbil.....	25

3 Disseny del hardware.....	27
3.1 Fonaments del disseny del hardware.....	27
3.2 Hèlixs	27
3.3 Motors.....	28
3.4 ESC (Electronic Speed Controller)	30
3.5 Bateria	31
3.5.1 Càlcul del temps de funcionament	32
3.6 Carregador de la bateria.....	33
3.7 Sensor	34
3.8 Microcontrolador	36
3.9 Comprovador de bateries LiPo/LiFe/NiMh/NiCd	37
3.10 Configuració final.....	37
4 Alternatives	39
4.1 Alternatives estructurals	39
4.2. Alternatives del hardware.....	39
5 Disseny del Software.....	41
5.1 Entorn de programació	41
5.2 Creació del software	42
5.2.1 Bloc Motor	42
5.2.1.1 Activació dels ESCs.....	42
5.2.2 Bloc Sensor	44

5.2.2.1 Càlcul de l'angle	44
5.2.3 Bloc Control.....	46
5.2.3.1 Disseny del control PI.....	47
5.2.4 Bloc Interfície	51
6 Proves experimentals.....	52
6.1 Control de la posició angular	52
6.1.1 Control de la posició angular amb un motor	52
6.1.1.1 Sense filtre	52
6.1.1.2 Amb filtre.....	57
6.1.2 Control de la posició angular amb dos motors.....	60
7 Problemes d'implementació i solucions aportades.....	69
8 Conclusions i recomanacions futures	71
8.1 Resum de característiques	71
8.2 Conclusions finals.....	73
8.3 Recomanacions futures	74
8.3.1 Tasques recomanades.....	74
8.3.2 Temps estimat per la realització de les tasques futures.....	75
9 Aspectes ambientals i de seguretat.....	76
9.1 Fase de construcció de la planta experimental	76
9.2 Fase d'utilització de la planta experimental.....	76
9.3 Fase de desmantellament de la planta experimental	77

10 Viabilitat econòmica	78
11 Bibliografia	80

Índex de figures

Figura 1. Llistons de fusta de pi blanc.	16
Figura 2. Taulers de fusta MDF.	16
Figura 3. Làmines d'alumini.	17
Figura 4. Barres d'acer.	17
Figura 5. Croquis de l'estructura amb les característiques bàsiques.	18
Figura 6. Estructura final (Fontal).	19
Figura 7. Estructura final (Lateral).	20
Figura 8. Base.	21
Figura 9. Barres d'acer principals.	21
Figura 10. Suport inferior.	22
Figura 11. Suport vertical.	23
Figura 12. Suport superior.	23
Figura 13. Suport dels cables.	24
Figura 14. Suport del microcontrolador.	24
Figura 15. Suport de la bateria.	25
Figura 16. Part mòbil.	26
Figura 17. Hèlixs 5x3" de fibra de carboni.	28
Figura 18. Motor EMAX MT1806.	29
Figura 19. Dimensions MT1806.	30
Figura 20. ESC EMAX BLHeli Series 12A.	31

Figura 21. Bateria LiPo AeroEnergy 2700 mAh.	32
Figura 22. Carregador IMAX B6-AC Compact.	34
Figura 23. MPU-6050.	35
Figura 24. Arduino UNO.....	36
Figura 25. Comprovador de bateries LiPo/LiFe/NiMh/NiCd.	37
Figura 26. Esquema elèctric de la configuració final.	38
Figura 27. Disseny inicial de la guia.....	39
Figura 28. IDE d'Arduino.....	41
Figura 29. Codi d'activació dels ESCs.....	43
Figura 30. Diagrama de blocs del control PI amb un únic motor.....	48
Figura 31. Algoritme de control amb un motor.	49
Figura 32. Diagrama de blocs del control PI amb un únic motor.....	49
Figura 33. Algoritme de control amb dos motors.	51
Figura 34. Interfície.	51
Figura 35. Angle (2,5°) vs Temps (12s/), (Kp=2,4; Ki=33,65; Consigna=5°).....	54
Figura 36. Angle (6°) vs Temps (15s/), (Kp=2,4; Ki=33,65; Consigna = 10°).....	55
Figura 37. Angle (5°) vs Temps (13s/), (Kp=2,4; Ki=33,65; Consigna = 15°).....	55
Figura 38. Angle (5°) vs Temps (14s/), (Kp=2,4; Ki=33,65; Consigna = 20°).....	56
Figura 39. Angle (2,5°) vs Temps (12s/), (Kp=2,8; Ki=33,7; Consigna = 5°).....	58
Figura 40. Angle (6°) vs Temps (14s/), (Kp=2,8; Ki=33,7; Consigna = 10°).....	58
Figura 41. Angle (5°) vs Temps (13s/), (Kp=2,8; Ki=33,7; Consigna = 15°).....	59

Figura 42. Angle (4°) vs Temps (14s/), ($K_p=2,8$; $K_i=33,7$; Consigna = 20°).....	59
Figura 43. Angle (4°) vs Temps (10s/), ($K_p=0,4$; $K_i=0,04$; Consigna = 0°).....	62
Figura 44. Angle ($2,5^\circ$) vs Temps (10s/), ($K_p=0,4$; $K_i=0,04$; Consigna = 5°).....	63
Figura 45. Angle (3°) vs Temps (10s/), ($K_p=0,4$; $K_i=0,04$; Consigna = 10°).....	63
Figura 46. Angle (5°) vs Temps (10s/), ($K_p=0,4$; $K_i=0,04$; Consigna = 15°).....	64
Figura 47. Angle (5°) vs Temps (10s/),/ ($K_p=0,4$; $K_i=0,04$; Consigna = 20°).....	64
Figura 48. Angle ($2,5^\circ$) vs Temps (10s/), ($K_p=0,4$; $K_i=0,04$; Consigna = -5°).....	65
Figura 49. Angle (3°) vs Temps (10s/), ($K_p=0,4$; $K_i=0,04$; Consigna = -10°).....	65
Figura 50. Angle (5°) vs Temps (10s/), ($K_p=0,4$; $K_i=0,04$; Consigna = -15°).....	66
Figura 51. Angle (5°) vs Temps (10s/), ($K_p=0,4$; $K_i=0,04$; Consigna = -20°).....	67
Figura 52. Planta experimental definitiva (Frontal).....	71
Figura 53. Planta experimental definitiva (Lateral).....	72
Figura 54. Planta experimental definitiva (Posterior).....	72

Índex de taules

Taula 1. Característiques principals dels motors.	28
Taula 2. Variació de les característiques dels motors en funció del voltatge i del tipus d'hèlix.....	29
Taula 3. Principals característiques de l'ESC.....	30
Taula 4. Característiques principals de la bateria seleccionada.	32
Taula 5. Característiques principals del carregador.	33
Taula 6. Característiques principals de l'MPU-6050.	35
Taula 7. Especificacions tècniques de l'Arduino UNO.	36
Taula 8. Característiques principals del comprovador de bateries.	37
Taula 9. Taula comparativa entre Arduino UNO i Arduino MEGA.	40
Taula 10. Característiques principals de la planta experimental.	71
Taula 11. Temps estimat per la realització de les tasques futures.	75
Taula 12. Nou pressupost de recursos humans.	78
Taula 13. Nou pressupost total.	79

Llistat d'abreviatures

UAV: Unmanned Aerial Vehicle (Vehicle Aeri No Tripulat).

MDF: Medium Density Fiberboard (Tauler de Densitat Mitjana) .

ESC: Electronic Speed controller (Controlador Electrònic de Velocitat).

PWM: Pulse-Width Modulation (Modulació per Ample de Pols).

IDE: Integrated Development Environment (Entorn Integrat de Desenvolupament).

PI: Proporcional - Integral.

CW: ClockWise (Sentit horari).

CCW: CounterClockWise (Sentit antihorari).

PID: Proporcional – Integral – Derivatiu.

1 Introducció

1.1 Objecte

L'objecte d'aquest projecte és el disseny i muntatge d'una planta experimental de laboratori que permeti assajar diferents aspectes d'un UAV, com ara algorismes de control, mesures de sensors, control de motors, etc.

1.2 Abast

La realització d'aquest projecte inclou:

- Definir les característiques de la bancada: dimensions, materials, forma, etc.
- Definir l'electrònica i la instrumentació necessària per la realització del projecte: sensors, servomotors, controladors, etc.
- Muntar la planta experimental amb les característiques i components definits.
- Aprendre i millorar el coneixement del llenguatge utilitzat en la programació.
- Crear els diferents algorismes de programació que permetin controlar la posició angular de l'UAV sobre l'eix X.
- Realitzar proves experimentals per tal de definir el funcionament de la planta.

1.3 Justificació

El principal motiu per la realització d'aquest projecte és l'aprendre i la comprensió del funcionament dels diferents components electrònics, a més d'ampliar els coneixements i l'habilitat a l'hora d'utilitzar llenguatge de programació, en aquest cas, llenguatge C/C++.

1.4 Especificacions

Els principals requisits fixats per la realització del projecte són els següents:

- La planta experimental no pot mesurar més d'1m d'alçada, llargada ni d'amplada.
- L'UAV ha de tenir, com a mínim, 1 grau de llibertat (gir sobre l'eix X).
- El pes màxim que pot tenir la planta experimental és de 3 Kg.

2 Disseny estructural de la planta experimental

2.1 Fonaments del disseny estructural

A l'hora de realitzar el disseny de l'estructura, el pes i la resistència són els principals factors a tenir en compte.

L'estructura està formada per dues parts principals: una part fixa i una part mòbil.

Pel que fa a la part estructural, tant el pes com la resistència s'han de tenir en compte. Es tracta d'una planta experimental de laboratori, per tant, ha de tenir un pes baix per tal de facilitar-ne el transport i, una resistència capaç d'aguantar la força exercida pels motor, encara que no actüï directament sobre la part fixa de l'estructura.

D'altra banda, el pes és el factor crític en el disseny de la part mòbil, la qual consisteix bàsicament en el suport dels motors. Els motors tenen una força d'empenta màxima, per tant, si aquesta part és massa pesada no seran capaços d'aixecar-la o fer-la girar. A més a més, la duració de la bateria es veuria reduïda. La resistència també juga un paper important en el disseny de la part mòbil, ja que ha de ser capaç de suportar l'esforç provocat pels motors.

Un altre aspecte a tenir en compte en el disseny de la planta experimental és la facilitat de reparació. Una manera d'aconseguir-ho seria que les parts depenguin poc les unes de les altres, d'aquesta manera seria més fàcil reemplaçar-les.

2.2 Selecció dels materials

La intenció és construir l'estructura de la planta des de zero i amb el mínim cost possible, és a dir, fabricar les diferents parts a partir de materials aprofitats, evitant comprar la major part del material o peces prefabricades.

Els principals materials utilitzats per construir l'estructura són els següents:

- Llistons/ taulers de fusta:

La principal raó d'utilitzar taulers de fusta MDF i llistons de fusta de pi blanc és que no ha estat necessari comprar-los, ja que es disposava de restes de llistons i taulers que s'han pogut aprofitar perfectament per la construcció de l'estructura.

A més a més, la baixa densitat de la fusta ($\approx 1,56 \text{ g/cm}^3$ de densitat real per totes les espècies [1]) fa que la planta no sigui excessivament pesada i que es pugui transportar sense cap dificultat.

Els llistons de fusta de pi blanc s'han utilitzat principalment per fabricar els suports de diversos elements que formen la planta.

Els taulers s'han utilitzat principalment per fabricar la base de la planta i un suport vertical (en l'eix Z) que permet subjectar els diferents suports creats a partir dels llistons de fusta.

La resistència mecànica de la fusta no és molt elevada, en les fustes més habituals pren valors entre 78 i 116 MPa [2]. Afortunadament, les parts fabricades amb fusta no estan sotmeses directament als esforços, per tant, no és necessari que tinguin una gran resistència.



Figura 1. Llistons de fusta de pi blanc.

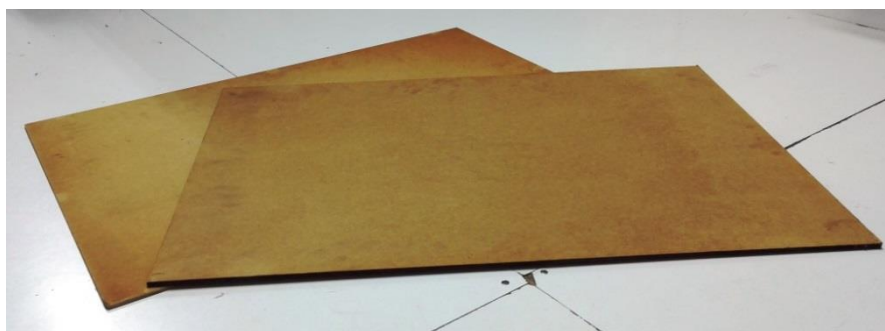


Figura 2. Taulers de fusta MDF.

- Làmina d'alumini:

S'ha utilitzat per fabricar el suport on van els motors.

Es tracta d'un metall amb propietats mecàniques molt útils per a la construcció de la planta. La baixa densitat ($2,7 \text{ g/cm}^3$) i una alta resistència mecànica, que en alguns aliatges d'alumini arriba a 690 MPa [3], el converteixen un material ideal per aquest fi, ja que, no suposa una gran càrrega pels motors i és suficient resistent per no trencar-se degut a l'esforç que exerceixen.



Figura 3. Làmines d'alumini.

- Barres d'acer:

S'han utilitzat 3 barres d'acer principals, una de 8mm de diàmetre i les altres dues de 4mm de diàmetre. La barra de major diàmetre actua com una guia que permet el moviment vertical. Les altres dues barres s'han utilitzat per impedir el gir sobre l'eix Z i per limitar l'angle de gir sobre l'eix X.

L'elevada resistència mecànica de l'acer, que en acers comuns acostuma a ser de 360 – 470 MPa [4], el converteix un material realment útil per resistir l'esforç causat pels motors i evitar el gir sobre l'eix Z.



Figura 4. Barres d'acer.

2.3 Característiques bàsiques de l'estructura

Després de seleccionar el material, el següent pas és definir les característiques bàsiques de la planta: les dimensions principals de la planta (llargada, amplada i alçada), els graus de llibertat i els límits d'aquests.

Les dimensions principals escollides són es següents:

- Llargada = 500 mm.
- Amplada = 400 mm.
- Alçada = 664 mm.

Els valors assignats a la llargada i a l'amplada corresponen als valors màxims d'aquestes dimensions, és a dir, no poden ser sobrepassats per cap altre element, ja sigui de l'estructura o del hardware.

El valor de l'alçada, correspon a l'alçada de la part fixa de l'estructura. Aquest valor pot ser sobrepassat per la part mòbil, però sense superar la restricció de les especificacions. L'alçada màxima dependrà de l'angle d'inclinació, de les dimensions i disposició dels elements que componen la part mòbil.

Pel que fa als graus de llibertat, l'únic moviment obligatori és el gir sobre l'eix X, el qual s'ha de poder controlar, però s'ha decidit fer el disseny amb un segon grau de llibertat que permeti el moviment vertical (eix Z) per si en un futur és volgués ampliar el projecte.

S'ha decidit limitar el gir sobre l'eix X a $\pm 50^\circ$ (aproximadament) i s'ha definit un desplaçament vertical de, com a màxim, 610 mm.

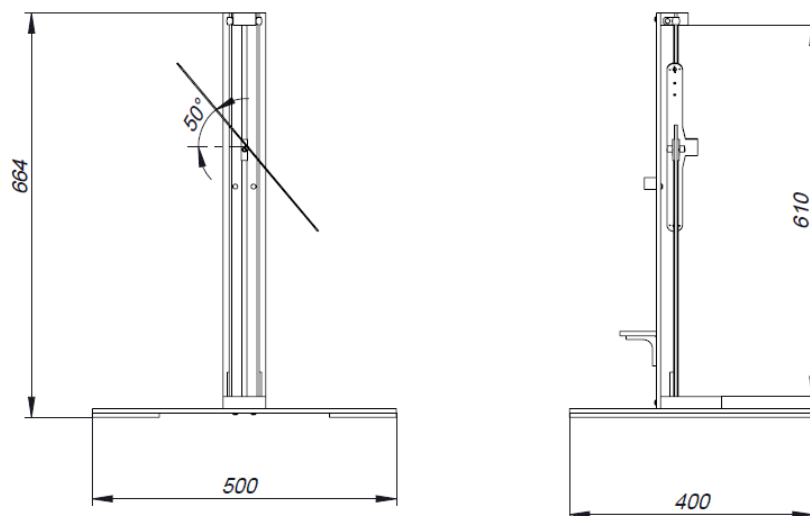


Figura 5. Croquis de l'estructura amb les característiques bàsiques.

Un cop decidides les característiques bàsiques, s'ha procedit a realitzar el disseny complet de l'estructura fins a obtenir un disseny capaç satisfer totes les necessitats.

2.4 Estructura final

La forma, les dimensions i la disposició en l'estructura dels elements mencionats en aquest apartat es poden consultar en els plànols.



Figura 6. Estructura final (Fontal).



Figura 7. Estructura final (Lateral).

2.4.1 Part fixa

Els elements principals que constitueixen la part fixa són: la base, les barres d'acer inoxidable, el suport inferior, el suport vertical, el suport superior, el suport dels cables, el suport del microcontrolador i el suport de la bateria.

2.4.1.1 Base

La base està formada per:

- Un retall de 500x400x7 mm d'un tauler de fusta MDF.
- Dos retalls de 400x110x7 mm, els quals s'uniran al retall mencionat en el punt anterior amb cola blanca.



Figura 8. Base.

2.4.1.2 Barres d'acer principals

La planta experimental disposa de 3 barres d'acer inoxidable principals. Les tres barres tenen una llargada de 650mm, però una de les barres és de 8mm de diàmetre i les altres dues barres són de 4mm de diàmetre.

La funció d'aquestes barres està explicada en l'apartat de la part mòbil, ja que es tracta d'una funció conjunta.

Les tres barres estan subjectades pels seus extrems mitjançant el suport inferior i el superior.



Figura 9. Barres d'acer principals.

2.4.1.3 Suport inferior

El suport inferior està format per un retall de 100x70x20 mm d'un llistó de fusta de pi blanc. Està unit a la base mitjançant quatre cargols de mètrica 4 mm i 20 mm de llargada.

Les tres barres d'acer principals estan subjectades per mitjà de forats de 20 mm de profunditat.

En aquest suport també hi ha dues barres d'acer inoxidable de 6mm de diàmetre i 45mm de llargada, les quals estan subjectades per mitjà de forats de 5 mm de profunditat. Aquestes barres mantenen el suport dels motors completament horitzontal en la posició més baixa.

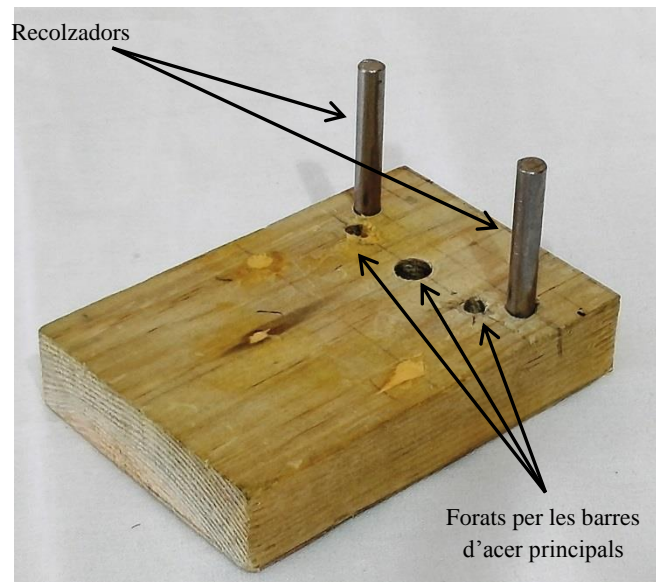


Figura 10. Suport inferior.

2.4.1.4 Suport vertical

El suport vertical està format per un retall de 650x70x7 mm d'un tauler de fusta MDF. Aquesta part de l'estructura està subjectada al suport inferior per mitjà de dos cargols de mètrica 4mm i 20mm de llargada.



Figura 11. Suport vertical.

2.4.1.5 Suport superior

El suport superior està format per un retall de 45x37x20 mm d'un llistó de fusta de pi blanc. Està unit al suport vertical mitjançant dos cargols de mètrica 4 mm i 20 mm de llargada.

La barra de 8mm de diàmetre està subjectada mitjançant un forat de 20mm de profunditat en el suport. Les altres dues barres estan agafades utilitzant unes subjeccions metàl·liques anomenades grapes, les quals estan unides a banda i banda del suport amb un cargol de mètrica 4 mm i 10 mm de llargada per cada grapa. A l'interior de cada grapa hi ha un tub de nylon de 8mm de diàmetre exterior i 4mm de diàmetre interior.

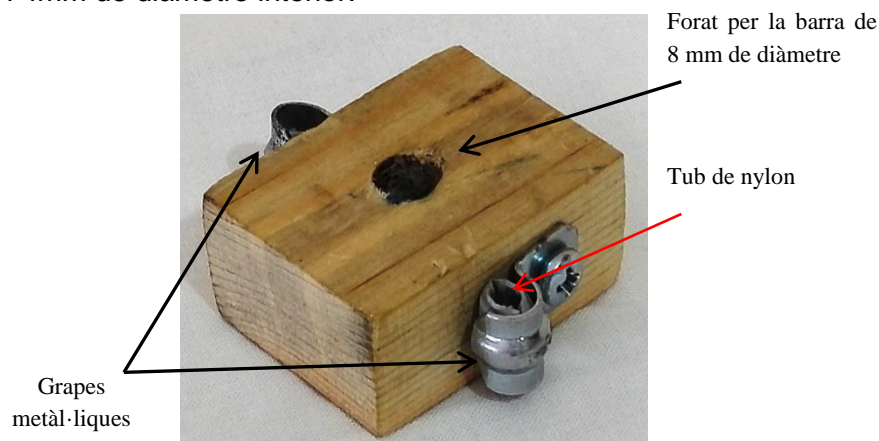


Figura 12. Suport superior.

2.4.1.6 Suport dels cables

El suport dels cables està format per un retall de 70x20x20 mm d'un llistó de fusta de pi blanc. Està subjectat al suport vertical amb dos cargols de mètrica 4 mm i 20 mm de llargada.

Per tal de poder subjectar els cables s'han fet uns forats a la cara que està en contacte amb el suport vertical.

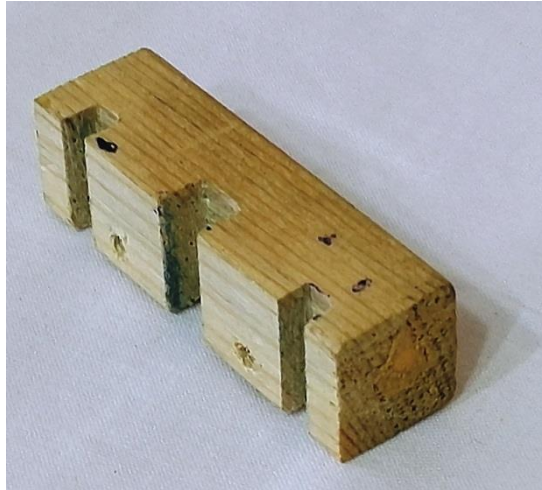


Figura 13. Suport dels cables.

2.4.1.7 Suport del microcontrolador

El suport del microcontrolador consisteix en un retall de 70x60x7 mm d'un tauler de fusta MDF. Està unit al suport vertical mitjançant un angle de reforç de 50x50x20 mm i tres cargols de mètrica 4 mm i 10 mm de llargada.

El microcontrolador està subjectada al suport amb dos cargols de mètrica 3 mm i 6 mm de llargada.

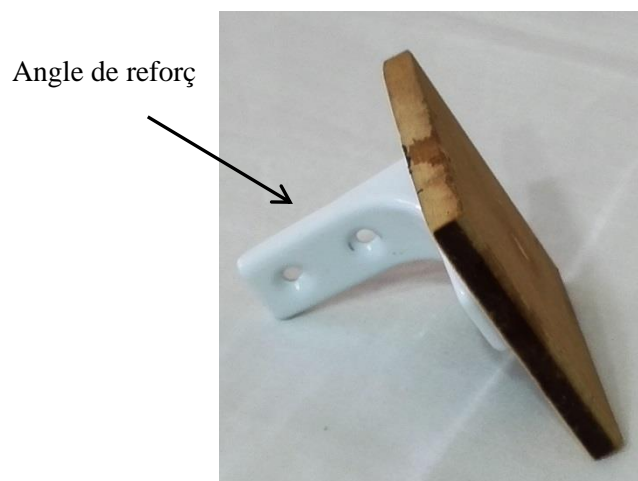


Figura 14. Suport del microcontrolador.

2.4.1.8 Suport de la bateria

El suport de la bateria és un retall de 121x30x2 mm d'una làmina d'alumini que s'ha deformat fins aconseguir una forma adequada per subjectar la bateria. Està subjectat al suport vertical mitjançant un cargol de mètrica 4 mm i 6 mm de llargada.

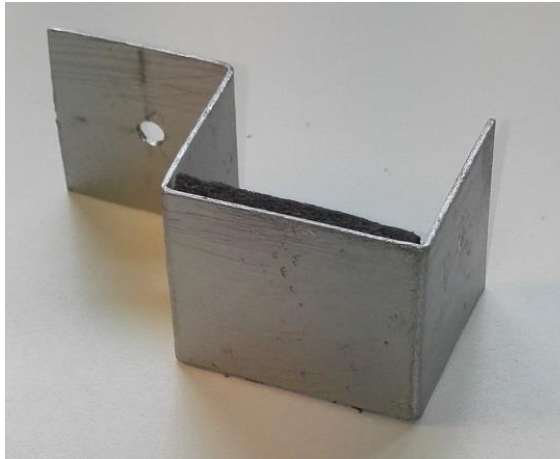


Figura 15. Suport de la bateria.

2.4.2 Part mòbil

La part mòbil de la planta experimental consta de tres elements principals:

- Suport dels motors.
- Tub d'acer inoxidable (Guia).
- Adaptació de la peça interior d'una regleta de connexió de 16 mm².

El suport dels motors s'ha obtingut a partir d'una làmina d'alumini de 360x50x2 mm. Cada motor està subjectat a un dels extrems del suport amb els cargols que estaven inclosos amb els motors.

A l'hora de tallar i donar forma a la làmina d'alumini, s'ha tingut en compte l'espai per col·locar el sensor i el forat per on passaran les tres barres d'acer inoxidable.

La combinació de les tres barres d'acer principals i el forat del suport dels motors permet la limitació del gir sobre l'eix X definida prèviament. A més a més, s'impedeix el gir sobre l'eix Z.

El tub d'acer té un diàmetre interior de 8 mm, a través d'aquest tub passa la barra d'acer de 8mm de diàmetre i 650mm de llarg que actua com una guia, d'aquesta manera es fa possible el moviment vertical. L'interior d'aquest tub s'ha llimat per tal de reduir la fricció amb la barra.

El tub d'acer té soldades dues barres d'acer de 4 mm de diàmetre i 10 mm de llargada. Aquestes barres passen a través de la peça metàl·lica que hi ha a l'interior d'una regleta de connexió de 16 mm², la qual va unida a la làmina d'alumini mitjançant un cargol de mètrica 4 mm i 6 mm de llargada. Així es fa possible el gir sobre l'eix X.

Per poder obtenir la part metàl·lica de la regleta de connexió s'ha tret de l'interior del plàstic i s'ha adaptat amb molt de compte a la mida desitjada.



Figura 16. Part mòbil.

3 Disseny del hardware

3.1 Fonaments del disseny del hardware

A l'hora de dissenyar el hardware, els principals aspectes que s'han de tenir en compte per tal de posar en funcionament la planta experimental d'assaig per UAVs són els següents:

- Determinar el tipus de motor amb unes característiques que puguin satisfer les necessitats.
- Determinar quanta energia serà necessària.
- Determinar el tipus de sensor necessari per determinar la posició angular.
- Escollir el microcontrolador amb una capacitat de càlcul suficient i amb les connexions necessàries per comunicar-se amb la resta de components.

En els següents apartats hi ha una explicació sobre els diferents elements del hardware seleccionats.

3.2 Hèlixs

Abans de seleccionar els components electrònics s'ha de determinar el tipus d'hèlix que s'utilitzarà, ja que no es poden sobrepassar les dimensions de la planta definides en l'apartat 2.3.

Per aquest motiu, el diàmetre de les hèlix ha de ser igual o inferior a 6".

Finalment, les hèlixs seleccionades són dues hèlixs bipala de 5x3", una CW i l'altra CCW. [5]

No tots els motors funcionen correctament amb qualsevol hèlix, per tant, és necessari triar motors que siguin compatibles amb les hèlix escollides.

Un altre aspecte que s'ha tingut en compte a l'hora de seleccionar les hèlix és el material. Les hèlixs seleccionades estan fetes de fibra de carboni caracteritzat per tenir una elevada proporció resistència/pes.



Figura 17. Hèlixs 5x3" de fibra de carboni.

Font: [5]

3.3 Motors

Els motors escollits són els EMAX MT1806 CW i CCW [5], els quals són compatibles amb hèlixs de 5". L'empenta màxima de cada motor per hèlixs de 5x3" és de 210g si s'alimenta amb 7,4V i de 380g si s'alimenta amb 11,1V, tal i com es mostra en la taula 2.

Taula 1. Característiques principals dels motors.

Font: [5]

Marca	EMAX
Model	MT1806
Tipus de motor	Brushless
Nombre de cel·les de la bateria	2-3S LiPo (7,4 – 11,1V)
ESC recomanat	12A
Hèlix compatibles	5"-7"
KV	2280
Empenta màxima	460g
Pes	18g
Llargada	26,7mm
Diàmetre	23mm
Diàmetre de l'eix	2mm

Taula 2. Variació de les característiques dels motors en funció del voltatge i del tipus d'hèlix.

Font: [5]

The voltage (V)	Paddle size	current (A)	thrust (G)	power (W)	efficiency (G/W)	speed (RPM)
7.4	5030 ^{CF} Propeller	4.4	210	32.6	6.4	13530
	APC 6*4	6.8	280	50.3	5.6	12030
	5*4.5 ^{3-Blade} Propeller	6.2	240	45.9	5.2	12330
	7*4.5 ^{3-Blade} Propeller	11.2	310	82.9	3.7	6770
11.1	5030 ^{CF} Propeller	8	380	88.8	4.3	18510
	APC 6*4	11.3	460	125.4	3.7	15160
	5*4.5 ^{3-Blade} Propeller	10.6	410	117.7	3.5	15910

L'hèlix 5030 CF Propeller, que apareix a la taula 2, equival a una hèlix bipala de 5x3" de fibra de carboni. Quan una hèlix és tripala s'acostuma a indicar tal i com es pot veure en algunes de les hèlix de la taula 2.



Figura 18. Motor EMAX MT1806.

Font: [5]

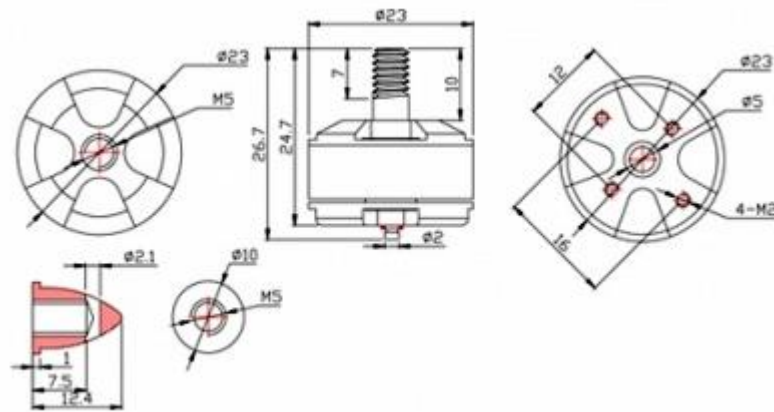


Figura 19. Dimensions MT1806.

Font: [5]

3.4 ESC (Electronic Speed Controller)

Un ESC és un circuit electrònic que serveix per controlar la velocitat d'un motor brushless generant una senyal trifàsica que l'alimenta. La velocitat de gir del motor es varia a partir d'una senyal proporcionada pels pins PWM.

L'ESC seleccionat és un ESC Brushless EMAX BLHeli Series de 12A [5], suficient per poder alimentar sense problemes els 8A de corrent màxim consumits per cada motor amb la configuració seleccionada.

Taula 3. Principals característiques de l'ESC.

Font: [5]

Marca	EMAX
Model	BLHeli Series
Amperatge continu	12A
Amperatge màxim	15A
Cel·les	2-4S LiPo
BEC	1A/5V
Dimensions	42x20x8mm
Pes	11g

Altres característiques de l'ESC són:

- Tots els paràmetres poden ser programats mitjançant l'ús d'una targeta de programació o d'un transmissor.

- Característiques de protecció múltiples, incloent protecció contra curtcircuits a baixa tensió/ protecció contra el sobreescalfament / protecció contra pèrdua de senyal de l'accelerador.
- El rang de l'accelerador pot ser configurat i és totalment compatible amb tots els receptors, proporcionant suavitat, lineal i precisa la resposta de l'accelerador.



Figura 20. ESC EMAX BLHeli Series 12A.

Font: [5]

3.5 Bateria

A l'hora de seleccionar la bateria adequada, cal tenir en compte principalment tres factors:

- Tipologia de bateria (LiPo, NiMH, plom, etc.).
- El voltatge de la bateria (nombre de cel·les).
- La capacitat de la bateria.

A diferència de les bateries NiMH o les de plom, les bateries LiPo són capaces de proporcionar una quantitat d'energia considerable en poc temps, a més de ser bastant lleugeres. Aquest són els principals motius pels quals s'ha escollit una bateria LiPo.

La bateria LiPo escollida és una AeroEnergy 2700mAh 3S (11,1V) [5] per tal de garantir un temps de funcionament acceptable.

Taula 4. Característiques principals de la bateria seleccionada.

Font: [5]

Marca	AeroEnergy
Tipus	LiPo
Nombre de cel·les	3 (11,1V)
Intensitat màxima continua	25C (67,5A)
Intensitat màxima discontinua	50C (135A)
Capacitat de carga	2C (5,4A)
Dimensions	28x35x103mm
Capacitat	2700mAh
Pes	-

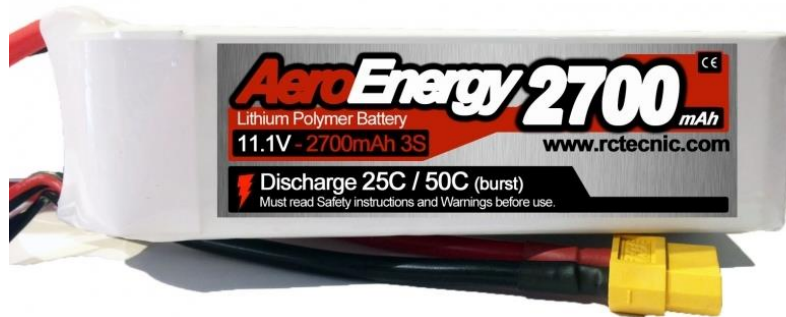


Figura 21. Bateria LiPo AeroEnergy 2700 mAh.

Font: [5]

Segons la taula 2, la configuració hèlix-bateria seleccionada dóna lloc a un corrent màxim de 8A i a una empenta màxima de 380g per cada motor.

3.5.1 Càlcul del temps de funcionament

Per poder realitzar el càlcul del temps que podrà estar en funcionament l'UAV només cal saber el consum dels motors, ja que el sensor s'alimenta a través de l'Arduino UNO, el qual s'alimenta mitjançant un cable USB connectat a un ordinador.

L'únic consum que es pot calcular teòricament és el consum a màxima potència:

$$\text{Consum de cada motor a màxima potència} = 8 \text{ A} \cdot 11,1 \text{ V} = 88,8 \text{ W/motor}$$

El consum total serà:

$$\text{Consum total a màxima potència} = 88,8 \text{ W} \cdot 2 \text{ motors} = 177,6 \text{ W}$$

Per tant, el temps de funcionament a màxima potència és:

$$\begin{aligned} \text{Temps de funcionament a màxima potència} &= \frac{2,7A \cdot 11,1V}{177,6W} = 0,16875\text{hores} \\ &= 10.125\text{minuts} \end{aligned}$$

Aquest és el temps de funcionament a màxima potència, però després de realitzar varies proves experimentals, es va poder comprovar que el tems d'autonomia és molt superior, ja que les bateries es carregaven al cap de dos dies després d'un ús considerable.

3.6 Carregador de la bateria

El carregador que s'ha d'utilitzar per carregar la bateria seleccionada ha de ser capaç de balancejar la carga de les 3 cel·les, per tal d'assegurar que totes tinguin el mateix voltatge.

Taula 5. Característiques principals del carregador.

Font: [5]

Marca	IMAX
Voltatge de funcionament	11-18V DC, 100-240V AC
Corrent de càrrega	Fins 5.0 Amps
Potència de càrrega	50W
Capacitat de càrrega	Fins 1,5C
Bateries compatibles	NiCd/NiMH de 1 a 15 cel·les i LiPo de 1 a 6 cel·les

Altres característiques del carregador:

- Detecció automàtica del nombre d'elements de la bateria i la seva capacitat.
- Establiment automàtic de sortida de càrrega.
- Ports d'equilibrat de voltatge XH integrats per bateries LiPo.
- Càrrega balancejada extremadament precisa +/-0,01V.
- Alta potència: circuit de càrrega d'alt rendiment.



Figura 22. Carregador IMAX B6-AC Compact.

Font: [5]

3.7 Sensor

El sensor escollit per mesurar l'angle de gir és la IMU MPU-6050. [6]

Una IMU és un dispositiu que normalment incorpora un acceleròmetre que mesura acceleracions i un giroscopi que mesura velocitats angulars. Existeixen IMUs més sofisticades que també incorporen un magnetòmetre i/o un baròmetre.

L'MPU-6050 combina un giroscopi de 3 eixos i un acceleròmetre de 3 eixos en el mateix xip de silici, juntament amb un processador digital de moviment (Digital Motion Processor TM) que processa complexos algorismes de 6 eixos. Per tant, l'MPU-6050 és una IMU de 6 graus de llibertat. Aquest dispositiu pot comunicar-se amb altres dispositius, com ara el microcontrolador, a través d'un bus I2C auxiliar.

Taula 6. Característiques principals de l'MPU-6050.

Font: [6] [7]

Xip	MPU-6050
Breakout board	GY-521
Alimentació	3.3-5V (inclou un regulador intern LDO)
Comunicació	I2C
Fons d'escala del giroscopi programable per l'usuari	± 250 , ± 500 , ± 1000 i ± 2000 ° / seg (dps)
Fons d'escala de l'acceleròmetre programables per l'usuari	$\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ y $\pm 16g$
Pins de pas estàndard	2,54mm
Dimensions	2x1,6x0,1mm
Pes	5g

Altres característiques del sensor:

- Convertidor analògic - digital de 16bit en tots els eixos.
- Sensor de temperatura.



Figura 23. MPU-6050.

Font: [6]

3.8 Microcontrolador

Un microcontrolador és un circuit electrònic encarregat de gestionar i processar tota la informació dels diferents dispositius que té connectats.

El microcontrolador seleccionat està incorporat en la placa és l'Arduino UNO [8], el qual té de la capacitat de càlcul suficient per gestionar i processar tota la informació, també disposa de les connexions necessàries per l'MPU-6050 i els ESCs.

L'alimentació es pot realitzar connectant un cable USB a l'ordinador o utilitzant una pila o bateria.

Taula 7. Especificacions tècniques de l'Arduino UNO.

Font: [9]

Microcontrolador	ATmega328P
Tensió de funcionament	5V
Voltatge d'entrada (recomanat)	7-12V
Voltatge d'entrada (límit)	6-20V
Pins I/O Digitals	14 (dels quals 6 proporcionen sortida PWM)
PWM Pins I/O Digitals	6
Pins d'entrada analògica	6
Corrent continu per Pin I / O	20mA
Corrent continu pel Pin 3.3V	50mA
Memòria flash	32 KB (ATmega328P) dels quals 0,5 KB utilitzats pel carregador d'arrencada
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Velocitat del rellotge	16 MHz
Llargada	68,6mm
Amplada	53,4mm
Pes	25g



Figura 24. Arduino UNO.

Font: [8]

3.9 Comprovador de bateries LiPo/LiFe/NiMh/NiCd

S'ha seleccionat un comprovador de bateries compatible amb la bateria escollida per saber-ne el percentatge de la capacitat que li queda en tot moment.



Figura 25. Comprovador de bateries LiPo/LiFe/NiMh/NiCd.

Font: [5]

Taula 8. Característiques principals del comprovador de bateries.

Font: [5]

Model	LCD2-7S
Pantalla	LCD
Tipus de bateries compatibles	LiPo/LiFe/NiMh/NiCd
Nombre de cel·les per bateries LiPo/LiFe	2-7S
Nombre de cel·les per bateries NiMh/NiCd	2-7S

Indicacions en pantalla:

- Tensió individual per element.
- Voltatge total.
- Percentatge de la capacitat.

3.10 Configuració final

Els ESCs estan connectats a la bateria a través d'un adaptador XT-60 mascle soldat als cables d'alimentació.

Els cables de senyal dels ESCs s'han connectat al microcontrolador mitjançant pins soldats als extrems.

S'han utilitzat connectors d'or de 2mm de diàmetre per connectar els motors amb els ESC i per allargar els cables d'alimentació, evitant empalmar els cables amb cinta aïllant.

El sensor s'ha connectat al microcontrolador utilitzant cables dupont mascle/femella, els quals ja incorporen els pins que permeten la connexió.

Els ESCs estan subjectats al suport dels motors amb una brida de plàstic de 101mm de llargada i 2,5mm d'amplada per cada component.

El sensor està subjectat al suport dels motors mitjançant cinta adhesiva.

La placa Arduino UNO està subjectada al suport corresponents mitjançant dos cargols de mètrica 3 mm i 6 mm de llargada.

Per tal de tenir una visió global del sistema, a continuació es mostra l'esquema elèctric de tot el conjunt:

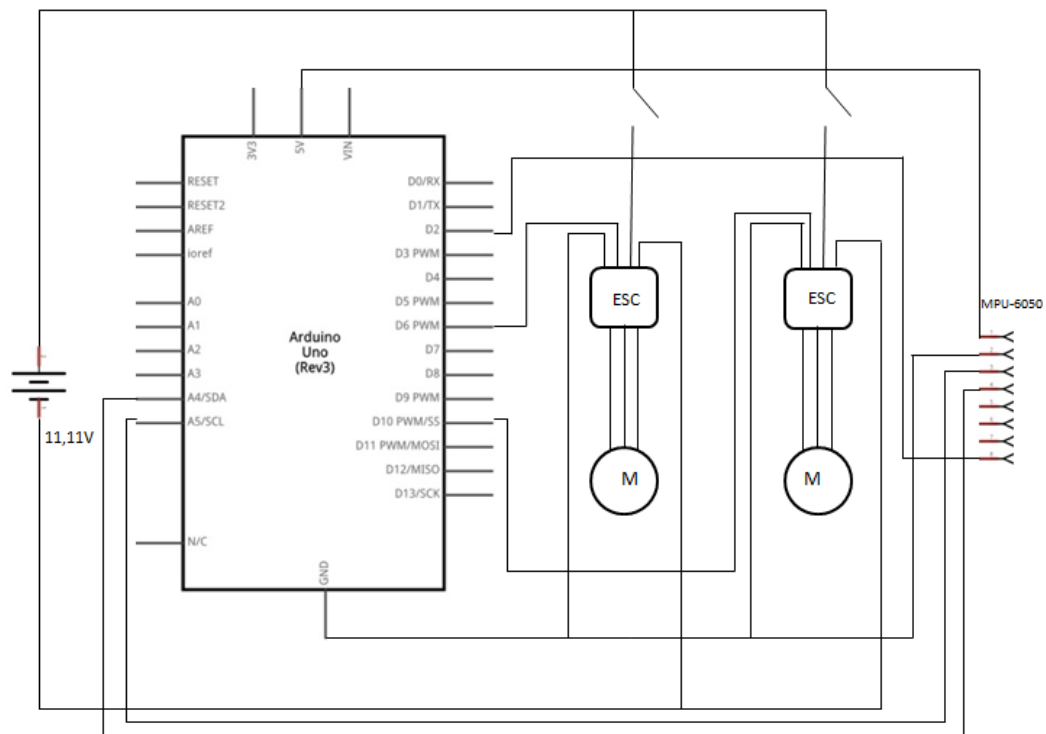


Figura 26. Esquema elèctric de la configuració final.

4 Alternatives

4.1 Alternatives estructurals

En el primer disseny de l'estructura, els graus de llibertats es van definir mitjançant la peça de la figura 27.

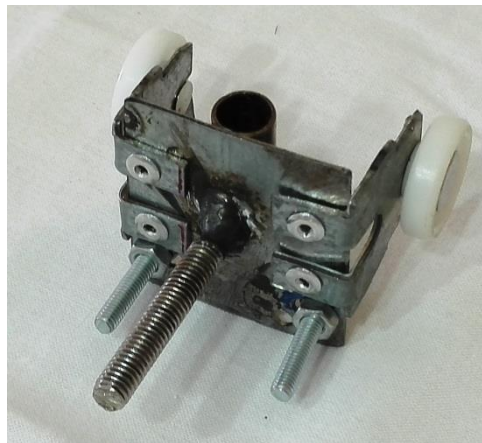


Figura 27. Disseny inicial de la guia.

Aquesta peça permetia el moviment vertical mitjançant un tub d'acer amb un diàmetre interior de 8mm. El gir en l'eix Z estava restringit pel contacte de les rodes laterals amb el suport vertical. L'angle quedava limitat per 2 cargols de mètrica 4 mm i 20 mm de llargada.

Desafortunadament, els motors necessitaven utilitzar, com a mínim, un 50% de la seva potència per començar a aixecar aquesta peça, deixant un marge de velocitats molt petit per treballar.

Per aquest motiu es va continuar pensant en altres dissenys fins a arribar al disseny definitiu.

4.2. Alternatives del hardware

Durant l'elecció de les bateries, la decisió estava entre una bateria de 7,4 V i una d'11,1 V.

Una bateria de 7,4 V proporcionaria una empenta màxima de 210 g per cada motor, segons la taula 2.

Donat que el pes total de la part mòbil es de 169,49 g (incloent motors, ESCs i cables) i que la fricció no és molt gran, una bateria de 7,4 V hauria estat suficient.

Tot i així, es va decidir escollir una bateria d'11,1 V, la qual proporciona una empenta màxima de 380 g per cada motor, per si en un futur fos necessari realitzar proves experimentals amb la planta afegint una major càrrega.

Pel que fa al microcontrolador, la decisió estava entre la placa Arduino UNO i la placa de Arduino MEGA.

Taula 9. Taula comparativa entre Arduino UNO i Arduino MEGA.

Font: [9] [10]

	Arduino UNO	Arduino MEGA
Microcontrolador	ATmega328P	ATmega2560
Tensió de funcionament	5V	5V
Voltatge d'entrada (recomanat)	7-12V	7-12V
Voltatge d'entrada (límit)	6-20V	6-20V
Pins I/O Digitals	14 (dels quals 6 proporcionen sortida PWM)	54 (dels quals 15 proporcionen sortida PWM)
PWM Pins I/O Digitals	6	15
Pins d'entrada analògica	6	16
Corrent continu per Pin I / O	20mA	20mA
Corrent continu pel Pin 3.3V	50mA	50mA
Memòria flash	32 KB (ATmega328P) dels quals 0,5 KB utilitzats pel carregador d'arrencada	256 KB dels quals 8 KB utilitzats pel carregador d'arrencada
SRAM	2 KB (ATmega328P)	8 KB
EEPROM	1 KB (ATmega328P)	4 KB
Velocitat del rellotge	16 MHz	16 MHz
Llargada	68,6mm	101,52mm
Amplada	53,4mm	53,3mm
Pes	25g	37g
Preu aproximat	25 €	40€

A partir de la taula 8, resulta evident que l'Arduino MEGA disposa d'una capacitat de càlcul molt superior i d'una gran quantitat de pins.

L'elecció final va ser l'Arduino UNO, el qual disposa dels pins necessaris per connectar els ESCs i el sensor i té un preu notablement inferior.

5 Disseny del Software

5.1 Entorn de programació

La decisió d'utilitzar Arduino com a microcontrolador implica l'ús de l'IDE d'Arduino pel desenvolupament del software. Es tracta d'un entorn gratuït que facilita l'escriptura del codi i que permet pujar-lo a la placa. Aquest entorn està escrit en Java i està basat en "Processing" i en altres softwares gratuïts. El llenguatge del codi es C++. [11]

L'IDE d'Arduino conté un editor de text per escriure el codi, una àrea de missatges, una consola de text, una barra d'eines amb diverses funcions i una sèrie de menús. [12]

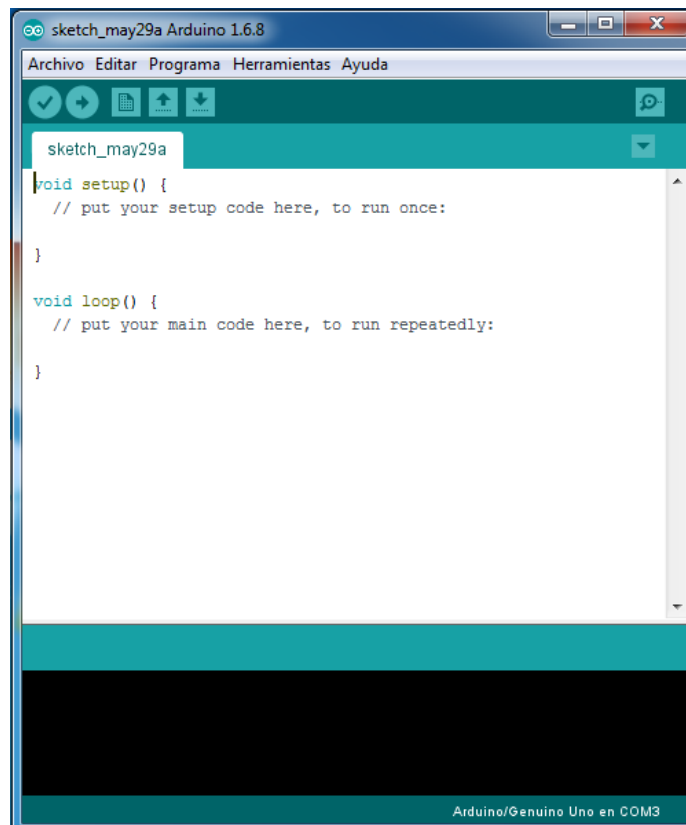


Figura 28. IDE d'Arduino.

5.2 Creació del software

Pel que fa al software, es pot dividir en quatre grans blocs:

- Bloc Motor
- Bloc Sensor
- Bloc Control
- Bloc Interfície

5.2.1 Bloc Motor

En aquest bloc s'apliquen les funcions relacionades amb l'activació dels motors i ESCs. L'objectiu és establir la comunicació entre la placa Arduino i els ESCs mitjançant els pins PWM.

L'annex A conté una breu explicació sobre el control i l'activació dels motors i ESCs.

5.2.1.1 Activació dels ESCs

Per tal de poder utilitzar els motors, s'han de seguir les pautes d'activació dels ESCs que es troben en les instruccions.

- Procediments d'arrencada normals:

Segons les instruccions, per tal d'activar l'ESC s'ha de moure la palanca d'acceleració del comandament a la posició inferior i connectar l'ESC a la bateria. A continuació s'hauria de sentir un so llarg en forma de "beep", el qual indica que s'ha detectat la posició inferior. Tot seguit, l'ESC hauria d'emetre diversos sons en forma de "beep" indicant el nombre de cel·les de la bateria. Finalment, quan l'auto-test hagi acabat, hauria de sonar una melodia confirmant l'activació "♪ 1 2 3".

Després de llegir les instruccions d'activació resulta evident que els ESCs estan pensats per funcionar amb comandaments de radiocontrol, això significa que el procés d'activació no serà igual que en les instruccions.

Tal i com està explicat en l'annex A, en la majoria d'ESCs i motors, el rang de funcionament per defecte és una senyal alta (un pols) entre 1000 i 2000 μ s que s'envia cada 20 ms. A més a més, els ESC han de rebre, durant 2-5 s, un pols d'activació per funcionar, el qual pot ser d'amplitud màxima (2 ms) o mínima (1 ms). [13] [14]

Atès que estan pensats per funcionar amb comandaments de radiocontrol, la documentació no especifica amb quina amplitud de pols s'activen, tot i així, el primer pas de les instruccions per activar l'ESC és moure la palanca d'acceleració del comandament a la posició inferior. A aquesta posició, els comandaments de radiocontrol normalment generen un pols d'amplitud mínima. [13]

Per tant, per poder activar els ESCs utilitzats en aquest projecte s'haurà d'enviar un pols d'amplitud mínima a través del codi.

Durant aquest procés d'activació no sonen tots els sons mencionats en les instruccions. No s'emete el "beep" que indica que s'ha detectat la posició inferior ni els que indiquen el nombre de cel·les de la bateria. En aquest cas, si l'activació s'ha realitzat correctament, els ESCs emeten directament una melodia d'activació "♪ 1 2 3" en connectar-los a la bateria. Si no s'han activat correctament, emeten constantment sons en forma de "beep".

El rang de funcionament mencionat anteriorment pot diferir lleugerament segons el tipus d'ESC.

En aquest cas, el rang de velocitats va de 1140 a 2140 µs per l'ESC connectat al motor CCW i, de 1150 a 2150 µs per l'ESC connectat al motor CW. No obstant això, cap ESC s'activa amb el valor mínim del seu rang. L'amplitud d'activació pel motor CCW és de 1135 µs i la del motor CW és de 1140 µs.

L'activació s'ha realitzat en el bloc *void setup* de la IDE d'Arduino, tal i com es pot veure en la següent figura:

```
void setup() {

  Serial.begin(VSERIAL); //Iniciar port serial
  //Amb les 5 línies següents s'inicia la comunicació I2C amb l'MPU-6050 i s'activa enviant un 0.
  Wire.begin();
  Wire.beginTransmission(MPU);
  Wire.write(0x6B);
  Wire.write(0); //Activació de l'MPU-6050.
  Wire.endTransmission(true);
  motor1.attach(PIN1); //Assignació del pin 10 a un dels motors/ESCs.
  motor2.attach(PIN2); //Assignació del pin 6 a l'altre motor/ESC.
  Serial.println("INICI DEL PROGRAMA \n CONTROL DE PARAMETRES: \n A o a per augmentar l'Angle Consigna 5 graus \n");
  Serial.println("Premere A o a per iniciar el programa un cop finalitzat el so de confirmacio");
  while (inicialitzacio == false) { //Creació d'un bucle que evita sortir del void setup si no s'envia una A o a.
    motor1.writeMicroseconds(1140); //Activació de l'ESC connectat al motor CW.
    motor2.writeMicroseconds(1135); //Activació de l'ESC connectat al motor CCW.
    EntradaDeDada = Serial.read(); //Lectura del byte rebut a través del Monitor Serie.
    if (EntradaDeDada == 65 || EntradaDeDada == 97) { //A o a
      inicialitzacio = true;
    }
  }
  delay(2500); //Temps d'espera de 2,5 segons.
}
```

Figura 29. Codi d'activació dels ESCs.

5.2.2 Bloc Sensor

Aquest bloc és l'encarregat de llegir els valors del sensor per tal de determinar la posició angular de l'UAV.

A partir de les lectures de l'acceleròmetre i del giroscopi que incorpora l'MPU-6050 es pot calcular l'angle d'inclinació.

5.2.2.1 Càlcul de l'angle

L'acceleròmetre que incorpora l'MPU-6050 mesura acceleracions lineals en g, mentre que el giroscopi mesura velocitats angulars en °/s. Per tant, la IMU no mesura angles, s'han de realitzar alguns càlculs.

El càlcul de l'angle es pot realitzar a partir de les lectures de l'acceleròmetre i/o del giroscopi.

- Angle a partir de les mesures de l'acceleròmetre:

L'acceleròmetre és capaç de detectar l'acceleració de la gravetat, per tant, situant l'MPU-6050 paral·lela al terra, l'acceleròmetre marcarà en l'eix Z 1g i en els altres eixos 0g ($1g=9,8m/s^2$).

A partir del valor de la gravetat (1g) i, coneixent la mesura que donen els tres eixos de l'acceleròmetre, l'angle d'inclinació de l'MPU-6050 es pot calcular per trigonometria [15] [16]:

$$AngleX = \arctg\left(\frac{AcceleracióY}{\sqrt{AcceleracióX^2 + AcceleracióZ^2}}\right)$$

$$AngleY = \arctg\left(\frac{AcceleracióX}{\sqrt{AcceleracióY^2 + AcceleracióZ^2}}\right)$$

On, *AcceleracióX*, *AcceleracióY* i *AcceleracióZ* són les acceleracions dels eixos X, Y i Z respectivament, del sistema de coordenades que gira amb la IMU.

Malauradament, atès que l'angle està calculat a partir de la gravetat, no és possible calcular l'angle de gir sobre l'eix Z. Per sort, l'angle de gir sobre l'eix Z no és necessari.

- Angle a partir del les mesures del giroscopi:

El giroscopi mesura velocitats angulars, és a dir, el nombre de graus que gira en un segon.

Si el valor de l'angle inicial de la IMU és conegut, es pot obtenir el valor de l'angle d'inclinació amb aquesta fórmula:

$$Angle = AngleAnterior + Giroscopi \cdot \Delta t$$

On, Δt és el temps transcorregut entre mesures, *AngleAnterior* és l'angle calculat l'instant anterior i *Giroscopi* és la lectura del giroscopi.

En l'instant inicial, el valor d'*AngleAnterior* seria el de l'angle inicial.

Aquesta fórmula no pot funcionar sola, perquè la mesura del giroscopi té una deriva temporal. És a dir, si es deixa quiet va augmentant el seu valor.

- Filtre Complementari [15] [17]:

En la realitat, el valor de l'angle calculat a partir de les lectures de l'acceleròmetre presenta soroll i, com a conseqüència, el valor obtingut és poc precís.

Aquest soroll pot estar ocasionat per diversos factors: errors en els temps d'execució per part del programa utilitzat, perturbacions externes que alteren la lectura de l'acceleròmetre, etc.

La solució per disminuir el soroll ocasionat per les perturbacions que afecten a la lectura de l'acceleròmetre és utilitzar un filtre. Existeixen una gran quantitat de filtres, un dels millors i més famosos és l'anomenat Filtre de Kalman, el qual s'utilitza, per exemple, en coets, avions i satèl·lits geostacionaris.

El Filtre de Kalman és capaç de calcular l'error de cada mesura a partir de les mesures anteriors, eliminar-lo i donar el valor real de l'angle, però aquest filtre presenta dos problemes principals:

- És molt complicat d'entendre.
- Té un cost de processament bastant elevat.

Així doncs, s'ha utilitzat un altre tipus de filtre anomenat Filtre Complementari, que és ideal per utilitzar amb Arduino, ja que, és senzill d'utilitzar i té una bona precisió.

Aquest filtre és la combinació d'un filtre passa-alts pel giroscopi i un filtre passa-baixos per l'acceleròmetre.

L'expressió del Filtre Complementari és la següent:

$$Angle = 0,98 * (AngleAnterior + Giroscopi * \Delta t) + 0,02AngleAccel$$

On, *Giroscopi* és la lectura del giroscopi, Δt és el temps entre mesures, *AngleAccel* és l'angle calculat a partir de les lectures de l'acceleròmetre i *AngleAnterior* és l'angle calculat l'instant anterior.

D'aquesta manera, la lectura de l'acceleròmetre proporciona un angle inicial per poder calcular l'angle a partir de la lectura del giroscopi. També es minimitza el soroll degut a pertorbacions externes, ja que es dona un pes molt més gran al valor de l'angle obtingut amb les lectures giroscopi (0,98) que a l'obtingut amb les lectures de l'acceleròmetre (0,02).

Els valors que apareixen en el filtre complementari (0,98 i 0,02) es poden modificar, però sempre han de sumar 1. En aquest projecte 0,9 i 0,1 han donat un millor angle.

5.2.3 Bloc Control

Aquest bloc utilitza el valor de l'angle calculat anteriorment a partir de les mesures del sensor per controlar de la posició angular de l'UAV.

El software creat per poder controlar la posició angular està basat en un control PI.

La velocitat dels motors ve donada per un pols, en μs , que s'envia a través del codi. Per aquest motiu, en algunes ocasions aquest pols s'anomena directament velocitat dels motors, encara que tingui unitats de temps.

5.2.3.1 Disseny del control PI

L'objectiu és aconseguir que l'UAV sigui capaç d'anivellar-se automàticament davant de pertorbacions com l'acció del vent, cops en la superfície on es troba la planta experimental o les diferències entre motors que, encara que siguin tècnicament iguals, sempre presenten petites diferències.

Per tal d'aconseguir solucionar els problemes ocasionats per aquests factors s'ha utilitzat un control per realimentació anomenat control Proporcional - Integral que permeti controlar la posició angular.

Les 2 parts principal d'un control PI són [18] [19]:

- Part Proporcional (P): La senyal de control és proporcional a l'error entre l'angle consigna i l'angle real en aquell instant. Aquesta part ajuda a l'UAV a arribar a l'angle consigna, però és la que ocasiona una major inestabilitat.
- Part Integral (I): La senyal de control és proporcional a l'àrea sota la corba de l'error en el temps. Aquesta part ajuda a suavitzar l'efecte de la part proporcional en el règim permanent, proporciona una major estabilitat que permet combatre pertorbacions com les mencionades anteriorment.

Com que no es tracta d'una planta prefabricada, no es coneixen els valors de les constants K_p i K_i (guany proporcional i integral, respectivament). La millor manera de determinar-ne els valors és experimentalment, tenint en compte que:

- Un augment del guany proporcional (K_p) fa arribar l'UAV més ràpidament a l'angle consigna, però com ja s'ha mencionat, pot ocasionar un major sobreimpuls que n'augmenti la inestabilitat.
- Augmentar el valor del guany integral (K_i) suavitzarà l'efecte de la part proporcional, aconseguint una major estabilitat.

També cal mencionar que, si ambdós guanys són massa alts, la senyal de control enviada a la planta serà massa gran, donant lloc a més oscil·lacions i a una major inestabilitat.

S'han realitzat dues propostes de control PI, una correspon al control d'un únic motor, l'altra posposat correspon al control dels dos motors.

En la figura 30 es pot veure el diagrama de blocs que correspon al control PI amb un únic motor.

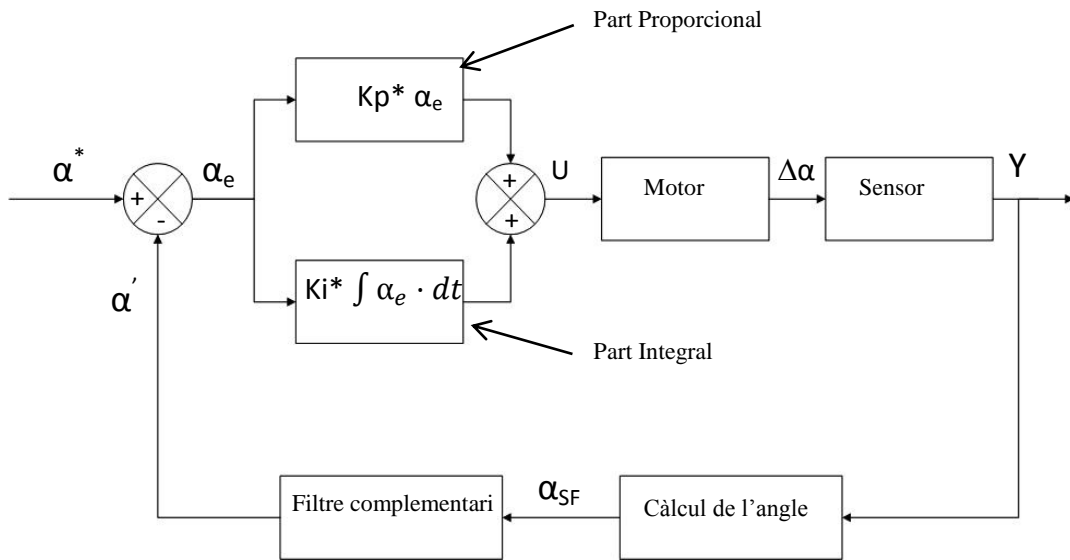


Figura 30. Diagrama de blocs del control PI amb un únic motor.

On, α^* és l'angle consigna, α_e és l'error entre l'angle consigna i l'angle d'inclinació de la planta en aquell instant, U és la senyal de control enviada a la planta, en aquest cas correspon a la velocitat del motor, $\Delta\alpha$ representa el canvi en la posició angular de l'UAV degut al moviment del motor, Y són les lectures de l'acceleròmetre i giroscopi, α_{SF} és el valor sense filtrar de l'angle calculat a partir de les lectures del sensor i, α' és l'angle filtrat utilitzant el Filtre Complementari.

El codi funciona bàsicament de la següent manera:

Es llegeixen les mesures de l'acceleròmetre i del giroscopi (Y) i s'utilitzen per calcular el valor sense filtrar de l'angle d'inclinació en graus (α_{SF}).

Per tal d'obtenir un angle més real i lliure de soroll (α'), s'aplica un filtre anomenat Filtre Complementari.

L'angle filtrat es resta a l'angle consigna (α^*) i, amb l'error resultant (α_e), s'aplica un control PI.

El valor obtingut a partir d'aquest control es força a ser sempre positiu mitjançant la programació, ja que es tracta d'un pols en μs (U), que correspon a la velocitat del motor.

Per últim, la velocitat que rep el motor del control PI ocasiona un canvi en la posició angular ($\Delta\alpha$) i és repeteix el cicle.

El temps de cicle és de 20 ms.

El codi corresponent a aquest cas es pot consultar en l'annex B.

La figura 31 mostra l'algorisme de control corresponent al control PI d'un motor.

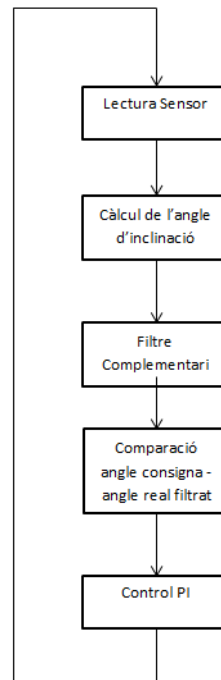


Figura 31. Algorisme de control amb un motor.

En la figura 32 es pot veure el diagrama de blocs que correspon al control PI amb els dos motors.

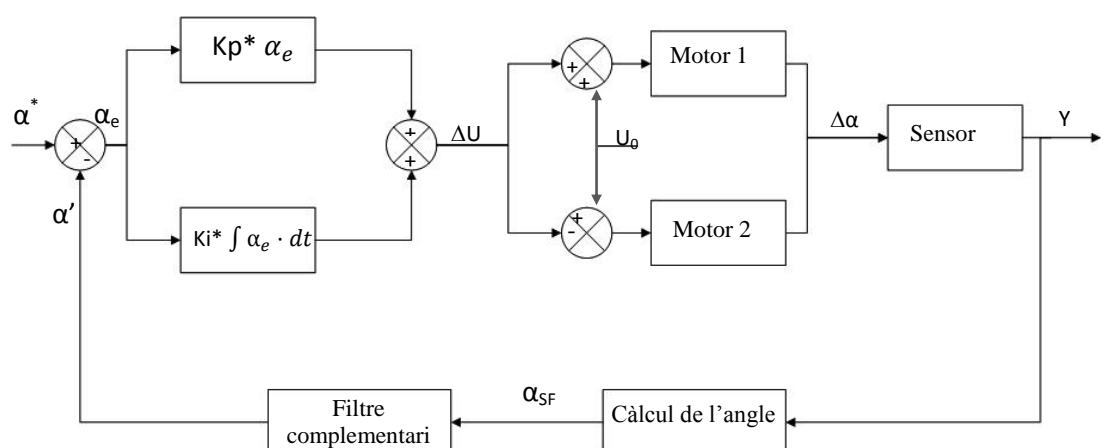


Figura 32. Diagrama de blocs del control PI amb un únic motor.

On, ΔU és el diferencial de velocitat entre els dos motors, U_0 s'anomena velocitat base, correspon a una velocitat prèviament fixada a partir de la qual es calcula la velocitat de cada motor. $\Delta\alpha$ representa el canvi de la posició angular degut al moviment dels motors. La resta de paràmetres tenen el mateix significat que en el cas anterior.

En aquest cas, el funcionament del codi és bàsicament el següent:

Es llegeixen les mesures de l'acceleròmetre i del giroscopi (Y) i s'utilitzen per calcular el valor en brut de l'angle d'inclinació en graus (α_{RAW}).

Per tal d'obtenir un angle més real i lliure de soroll (α'), s'aplica un filtre anomenat Filtre Complementari.

L'angle filtrat es resta a l'angle consigna (α^*) i, amb l'error resultant (α_e), s'aplica un control PI.

El valor obtingut a partir del control PI correspon a un valor (ΔU) considerablement més petit que la velocitat base i que l'obtingut en el codi anterior. És necessari que aquets valor pugui ser positiu i negatiu, per tant, no es modifica el seu signe.

A partir de la velocitat base i del diferencial de velocitat entre els dos motors, es calcula la velocitat de cada motor:

$$U_1 = U_0 + \Delta U$$

$$U_2 = U_0 - \Delta U$$

On, U_1 i U_2 corresponen cadascuna a la velocitat d'un dels dos motors en microsegons.

Per últim, les velocitats que reben els motors ocasionen un canvi en la posició angular ($\Delta\alpha$) i es repeteix el cicle.

El temps de cicles també és de 20 ms.

És important que ΔU pugui ser positiu i negatiu, perquè quan sigui negatiu, les expressions de les velocitats dels motors s'invertiran, permetent el gir en sentit horari i antihorari.

El codi corresponent a aquest cas es pot consultar en l'annex B.

La figura 33 mostra l'algorisme de control corresponent al control PI de dos motors.

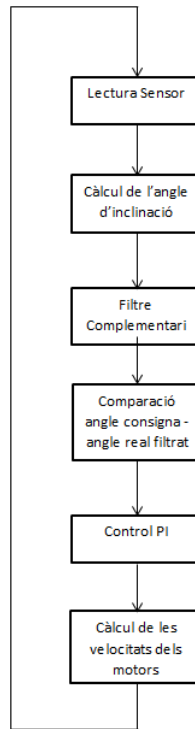


Figura 33. Algorisme de control amb dos motors.

5.2.4 Bloc Interfície

Aquest bloc simplement consisteix en una senzilla interfície que enllaça la resta de blocs i permet a l'usuari controlar el funcionament la planta experimental.

La interfície permet l'activació dels motors després d'haver activat els ESCs i controlar la posició angular de l'UAV augmentant o disminuint l'angle consigna.

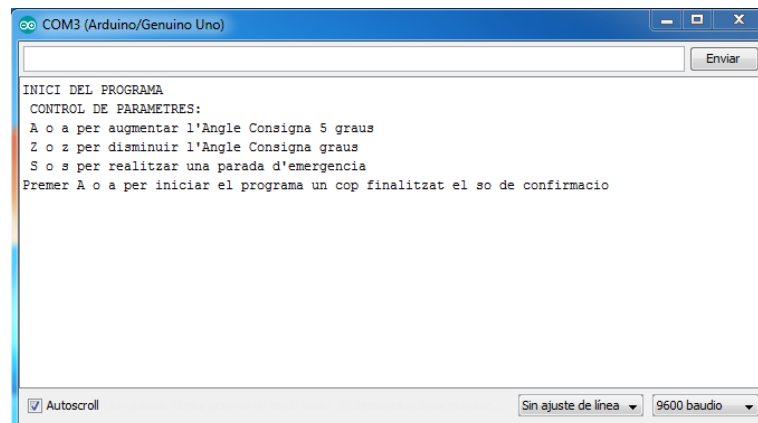


Figura 34. Interfície.

6 Proves experimentals

Els codis creats per les proves experimentals es poden consultar en l'annex B.

6.1 Control de la posició angular

L'objectiu d'aquestes proves és aconseguir que l'UAV s'estabilitzi al voltant d'un angle consigna fixat, el qual pot ser modificat a través de la interfície. Encara que l'angle de gir màxim sigui de $\pm 50^\circ$, s'ha decidit que l'angle consigna màxim sigui de $\pm 20^\circ$. Les proves s'han realitzat per $\pm 5^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 15^\circ$ i $\pm 20^\circ$.

Per tal de poder controlar la posició angular de l'UAV s'han implantat dos controls PI diferents. Un control per controlar la posició angular amb un únic motor en funcionament i, el segon control, per controlar la posició angular amb els dos motors.

En l'annex C, es poden apreciar alguns dels efectes causats en modificar els valors de diferents paràmetres durant les proves experimentals.

6.1.1 Control de la posició angular amb un motor

Les proves experimentals corresponents a aquest apartat només s'han realitzat amb angles positius, ja que, l'objectiu de les proves amb un motor és la familiarització amb el control PI.

6.1.1.1 Sense filtre

Per tal de poder controlar la posició angular, s'han anat modificant els valors de diferents paràmetres:

- Guany proporcional (K_p).
- Guany integral (K_i).
- Límit positiu de la integral (LP).
- Límit negatiu de la integral (LN).
- Velocitat màxima del motor.
- Velocitat mínima del motor.
- Temps de cicle (delay).
- Temps transcorregut entre dues mesures del sensor (Δt).

El primer pas ha estat definir la velocitat màxima i mínima.

La velocitat màxima s'ha limitat a 1230 μs , perquè és suficient per arribar als angles més grans sense cap dificultat. A més a més, com més gran és aquesta velocitat, més inestable es comporta l'UAV i més incòmode resulta treballar.

La velocitat mínima s'ha limitat a 1160 μs , perquè a aquesta velocitat comença a haver una mínima força de sustentació. Per velocitats inferiors a 1160 μs , la posició angular pràcticament no varia.

El segon pas ha estat determinar el valor del *delay* i de Δt .

Per determinar el valor del *delay* s'ha de tenir en compte que ha d'haver temps suficient per poder realitzar totes les mesures i càlculs. S'ha començat amb un valor relativament gran de 50 ms. Per aquest valor, l'UAV tardava massa a respondre, per tant, s'ha anat disminuint el valor fins arribar a 20 ms, el qual és suficientment gran per assegurar tots els càlculs i lectures i, a més a més, proporciona una resposta ràpida.

A Δt s'ha assignat el mateix valor que al *delay*, ja que el temps entre dues mesures del sensor consecutives és igual al temps de cicle.

Un cop definit el valors d'ambdues velocitats, el del *delay* i el de Δt , s'ha anat augmentant el guany proporcional fins a obtenir un valor que permeti a l'UAV arribar a l'angle consigna màxim establert (20°), mantenint en tot moment el valor del guany integral igual a zero.

Seguidament, amb un valor del guany integral diferent de zero, s'han definit uns valors inicials pels límits de la integral que minimitzen bastant l'efecte descrit en l'annex C. Aquests valors inicials són:

- LP=50.
- LN=-30.

A continuació, partint del valor del guany proporcional obtingut anteriorment, s'ha anat augmentant el valor del guany integral i disminuint el del proporcional fins a trobar uns valors que han permès obtenir els millors resultats possibles.

Finalment, a partir del valor definitiu del guany proporcional i el del guany integral, s'han acabat de definir els valors dels límits de la integral, millorant els resultats obtinguts.

Per realitzar aquestes proves s'ha tret l'hèlix del motor aturat, creant una diferència de pes suficient per fer baixar el motor en funcionament per sí mateix.

Així doncs, amb a questa configuració i, realitzant els passos mencionats, s'han obtingut els millors resultats amb la següent combinació de paràmetres:

- $K_p = 2,4$.
- $K_i = 33,65$.
- $LP = 35$.
- $LN = -5$.
- Velocitat màxima del motor = $1230 \mu s$.
- Velocitat mínima del motor = $1160 \mu s$.
- Delay = 20 ms.
- $\Delta t = 20 \text{ ms}$.

En les figures 35, 36, 37 i 38 es mostren els resultats obtinguts.

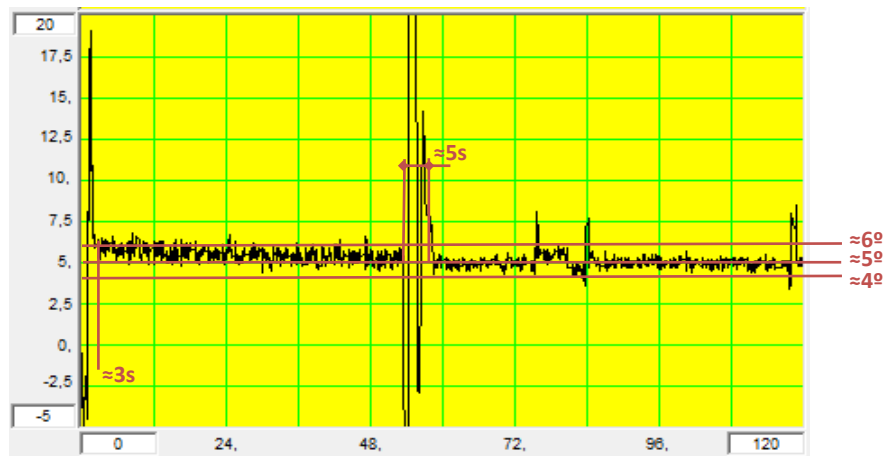


Figura 35. Angle (2,5°) vs Temps (12s/), ($K_p=2,4$; $K_i=33,65$; Consigna=5°).

En la figura 35, amb un angle consigna de 5° , es pot veure que les oscil·lacions al voltant de l'angle consigna tenen molt poca amplitud. Durant la major part del règim permanent, l'angle no arriba als 6° ni disminueix dels 4° .

El temps que tarda l'angle a estabilitzar-se des de l'instant inicial és d'uns 3 segons i, d'uns 5 segons després d'aplicar una pertorbació.

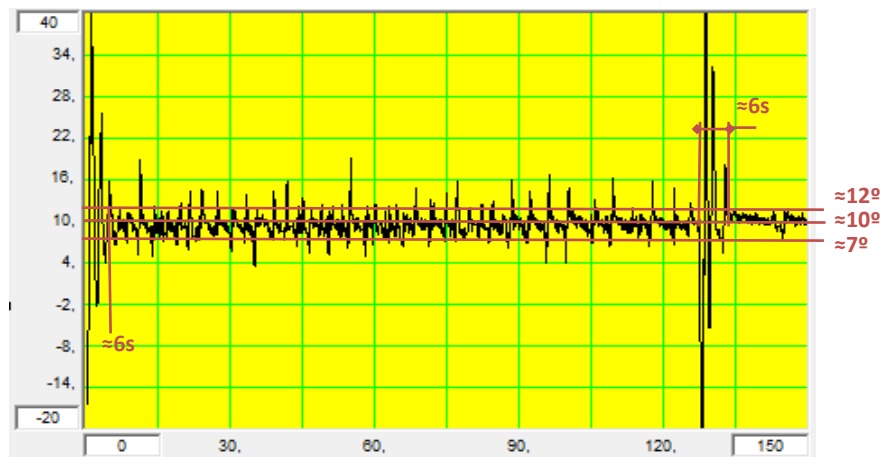


Figura 36. Angle (6°) vs Temps (15s), ($K_p=2,4$; $K_i=33,65$; Consigna = 10°).

En la figura 36, amb un angle consigna de 10°, l'amplitud de les oscil·lacions augmenta respecte al cas anterior. Durant bona part del règim permanent, l'angle oscil·la entre 7 i 12°, encara que, en alguns instants de temps arriba als 4 i 16°.

El temps d'estabilització des de l'instant inicial augmenta respecte al cas anterior, encara que segueix sent bastant petit. L'angle tarda a estabilitzar-se uns 6 segons des de l'instant inicial i, uns 6 segons després d'aplicar una pertorbació.

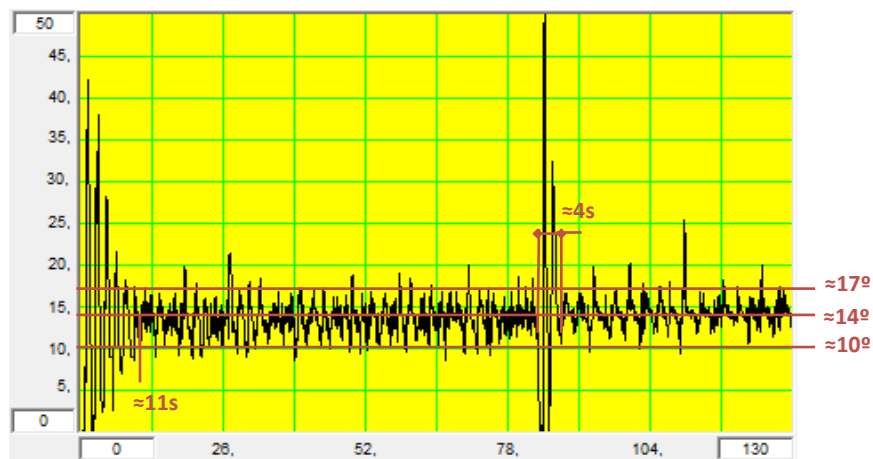


Figura 37. Angle (5°) vs Temps (13s), ($K_p=2,4$; $K_i=33,65$; Consigna = 15°).

En la figura 37, amb un angle consigna de 15°, es pot veure com s'ha perdut precisió, ja que l'angle no oscil·la al voltant de la consigna, sinó que oscil·la al voltant d'uns 14°.

L'amplitud de les oscil·lacions és més gran que en els casos anteriors. Durant bona part del règim permanent, l'angle oscil·la entre 10 i 17°, encara que en alguns instants de temps arriba als 9 i 20°.

El temps d'estabilització des de l'instant inicial també augmenta respecte als casos anteriors. L'angle tarda a estabilitzar-se uns 11 segons des de l'instant inicial i, uns 4 segons després d'aplicar una pertorbació.

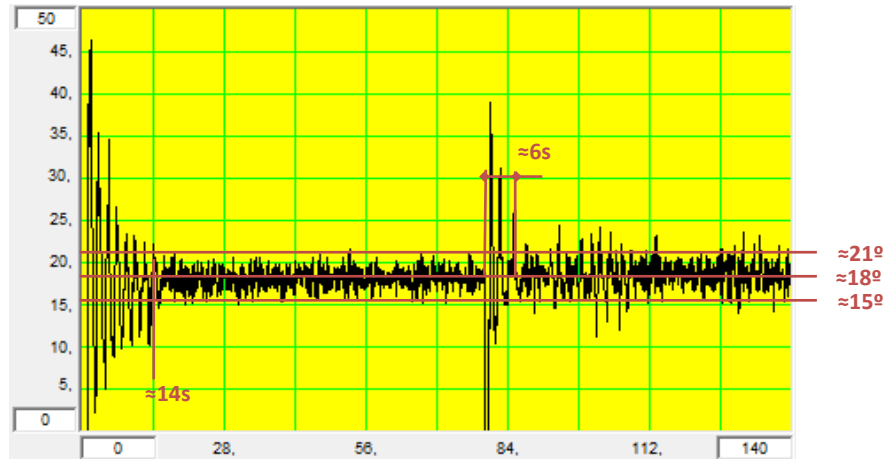


Figura 38. Angle (5º) vs Temps (14s), ($K_p=2,4$; $K_i=33,65$; Consigna = 20º).

Per últim, en la figura 38, amb un angle consigna de 20º, s'obté un resultat similar a l'anterior.

En aquest cas també es perd precisió, ja que l'angle no oscil·la al voltant de la consigna, sinó que oscil·la al voltant d'uns 18º.

L'amplitud de les oscil·lacions és més gran que en els dos primers casos. Durant bona part del règim permanent, l'angle oscil·la entre 15 i 21º.

El temps d'estabilització des de l'instant inicial augmenta respecte als casos anteriors. L'angle tarda a estabilitzar-se uns 14 segons des de l'instant inicial i, uns 6 segons després d'aplicar una pertorbació.

En general, es pot afirmar que a mesura que augmenta l'angle consigna també augmenta l'amplitud de les oscil·lacions i, per tant, disminueix l'estabilitat.

Un altre efecte visible és la disminució de la precisió en els angles més grans (15 i 20º), és a dir, l'angle oscil·la al voltant d'un angle lleugerament inferior a l'angle consigna.

El temps que tarda l'UAV a estabilitzar-se des de l'instant inicial augmenta a mesura que augmenta l'angle consigna. Com més gran sigui l'angle consigna en l'instant inicial, la velocitat amb què arrenca el motor també ho serà gràcies a l'efecte de la part proporcional (suposant que la posició inicial sigui la mateixa en cada cas), per tant, l'impuls inicial és més bruscat i, com a conseqüència a l'UAV li

costa més estabilitzar-se. Tot i això, els temps obtinguts són totalment admissibles, ja que en el pitjor dels casos, només són uns 14 segons.

D'altra banda, el temps d'estabilització després d'aplicar una pertorbació no segueix cap tipus de patró. Aquest temps pren valors entre 4 i 6 segons, els quals es poden considerar acceptables.

En conclusió, s'ha aconseguit que l'UAV es mantingui més o menys estable en l'angle consigna i, que el temps que tarda en estabilitzar-se no sigui massa gran. També s'ha pogut disminuir l'amplitud de les oscil·lacions fins a uns valors tolerables, sobretot si es té en compte que s'han utilitzat els valors dels angles sense filtrar.

6.1.1.2 Amb filtre

Després d'obtenir uns resultats acceptables, s'ha buscat una solució per tal de disminuir les oscil·lacions (soroll).

Com ja s'ha mencionat anteriorment, la solució és utilitzar un filtre anomenat Filtre Complementari.

Només s'ha hagut de modificar lleugerament el valor dels guanyos:

- $K_p=2,8$.
- $K_i=33,7$

Les figures 38, 39, 40 i 41 mostren els resultats obtinguts aplicant el filtre.

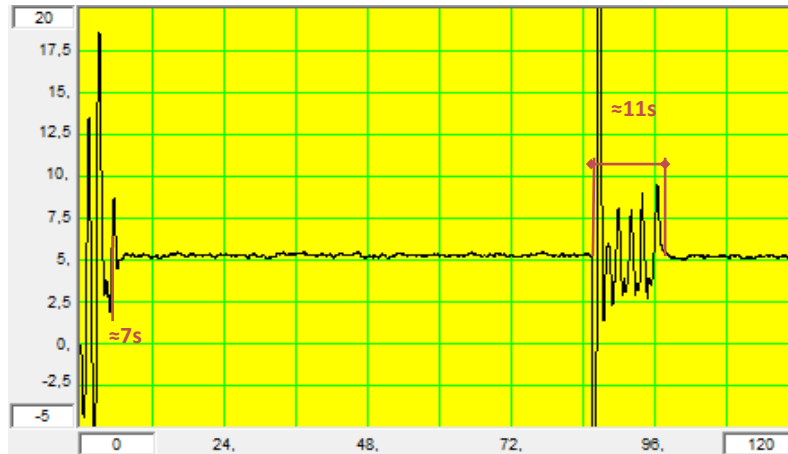


Figura 39. Angle (2,5°) vs Temps (12s/), ($K_p=2,8$; $K_i=33,7$; Consigna = 5°).

En la figura 39, amb un angle consigna de 5°, les oscil·lacions són pràcticament nul·les.

L'angle només tarda uns 7 segons a estabilitzar-se des de l'instant inicial i, uns 11 segons després d'aplicar una pertorbació.

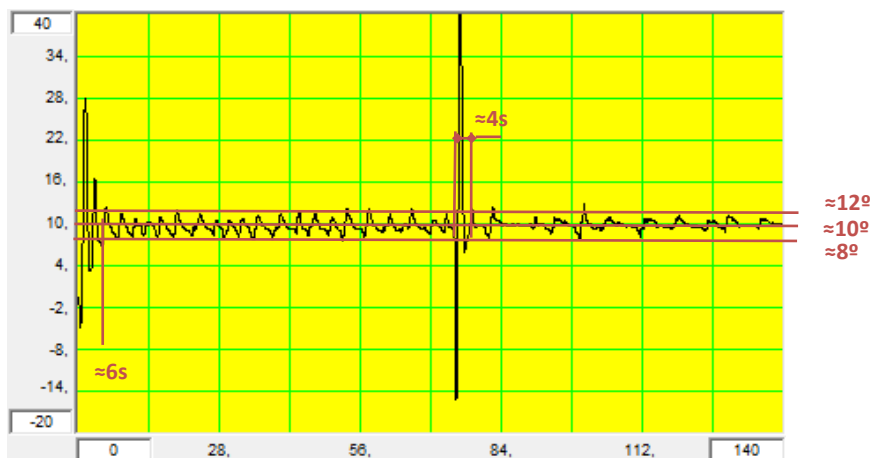


Figura 40. Angle (6°) vs Temps (14s/), ($K_p=2,8$; $K_i=33,7$; Consigna = 10°).

En la figura 40, amb un angle consigna de 10°, l'amplitud de les oscil·lacions augmenta respecte al cas anterior. Durant la major part del règim permanent, l'angle oscil·la per sota d'uns 12° i per sobre d'uns 8°, sense sobrepassar-los pràcticament en cap instant.

L'angle tarda uns 6 segons a estabilitzar-se des de l'instant inicial i, uns 4 segons després d'aplicar una pertorbació.

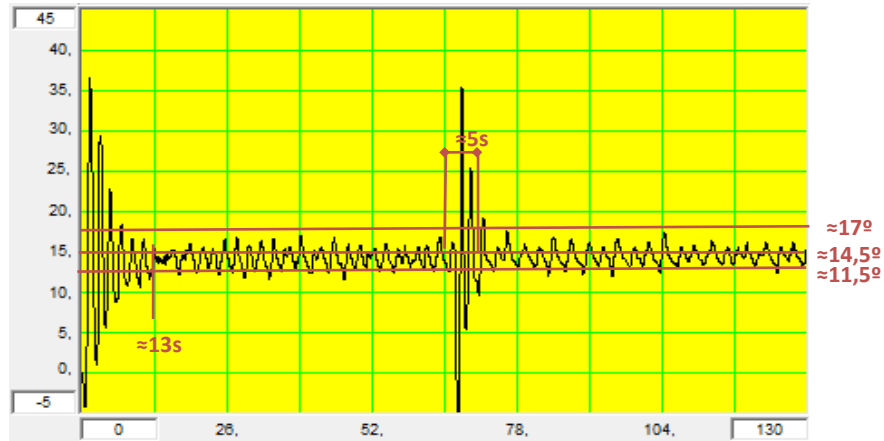


Figura 41. Angle (5°) vs Temps (13s/), ($K_p=2,8$; $K_i=33,7$; Consigna = 15°).

En la figura 41, amb un angle consigna de 15°, es pot veure com s'ha perdut una mica de precisió, ja que l'angle no oscil·la al voltant de la consigna, sinó que oscil·la al voltant d'uns 14,5°.

L'amplitud de les oscil·lacions és més gran que en els casos anteriors. Durant la major part del règim permanent, l'angle oscil·la per sota d'uns 17° i per sobre d'uns 11,5°, sense sobrepassar-los pràcticament en cap instant.

El temps d'estabilització des de l'instant inicial augmenta respecte als anteriors casos. L'angle tarda uns 13 segons a establir-se des de l'instant inicial i, uns 5 segons després d'aplicar una pertorbació.

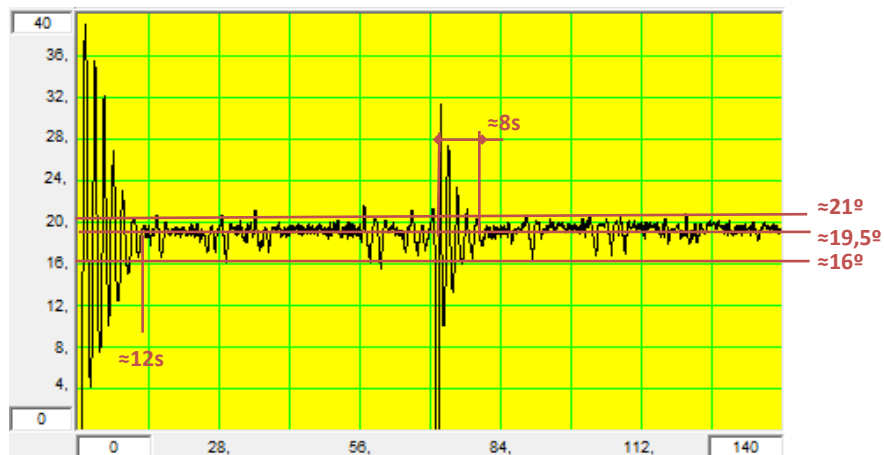


Figura 42. Angle (4°) vs Temps (14s/), ($K_p=2,8$; $K_i=33,7$; Consigna = 20°).

Per últim, en la figura 42, amb un angle consigna de 20°, s'obté un resultat similar a l'anterior.

En aquest cas, també es perd una mica de precisió, ja que l'angle no oscil·la al voltant de la consigna, sinó que oscil·la al voltant d'uns 19,5°.

L'amplitud de les oscil·lacions és lleugerament més gran que en els dos primers casos. Durant la major part del règim permanent, l'angle oscil·la per sota d'uns 21° i per sobre d'uns 16° , sense sobrepassar-los pràcticament en cap instant.

L'angle tarda uns 12 segons a estabilitzar-se des de l'instant inicial i, uns 8 segons després d'aplicar una pertorbació.

El comportament obtingut en aquest cas és molt semblant a l'obtingut sense filtre.

En general, a mesura que augmenta l'angle consigna també augmenta l'amplitud de les oscil·lacions i, per tant, disminueix l'estabilitat.

La precisió també disminueixen els angles més grans (15 i 20°).

El temps que tarda l'UAV en estabilitzar també augmenta a mesura que augmenta l'angle consigna (sobretot en l'instant inicial). En aquest cas, també s'han obtingut temps admissibles, perquè en el pitjor dels casos, només són uns 12 segons.

El temps d'estabilització després d'aplicar una pertorbació tampoc segueix cap tipus de patró, prenent valors entre 4 i 11 segons.

En conclusió, els resultats obtinguts amb el filtre tenen un comportament molt similar als obtingut sense filtre. Tot i així, els resultats són evidentment millors: l'amplitud de les oscil·lacions és inferior, el soroll ha disminuït i la precisió és més alta. És a dir, s'ha aconseguit un sistema més estable. El temps d'estabilització, en canvi, es manté en la mateixa ordre de magnitud.

Els valors entre els quals oscil·la l'angle i els temps que tarda en estabilitzar-se, s'han de prendre com una referència, perquè cada vegada que es realitzi la prova s'obtidran valors lleugerament diferents, tant amb filtre com sense filtre. Tot i així, el patró de comportament sempre ha estat el mateix.

6.1.2 Control de la posició angular amb dos motors

Un cop realitzats els assajos de la posició angular amb un sol motor, s'ha procedit a fer el mateix, però aquest cop utilitzant els dos motors.

Els paràmetres a modificar són pràcticament els mateixos que en l'assaig anterior:

- Guany proporcional (K_p).
- Guany integral (K_i).
- Límit positiu de la integral (LP).
- Límit negatiu de la integral (LN).
- Velocitat màxima del motor.
- Velocitat mínima del motor.
- Temps de cicle (delay).
- Temps transcorregut entre dues mesures del sensor (Δt).
- Velocitat base (U_0).

Per realitzar aquesta prova experimental, s'ha partit del codi utilitzat en les proves amb un motor, realitzant les pertinents modificacions.

Els passos seguits per obtenir els valors dels diferents paràmetres són pràcticament els mateixos que en les proves amb un motor.

El valor de la velocitat màxima, el de la mínima, el del *delay* i el de Δt , s'han definit de la mateixa manera que en l'apartat anterior.

Per determinar el valor de la velocitat base, s'ha decidit assignar-li una velocitat lleugerament superior a la mínima fixada. Per assegurar que amb aquest valor l'UAV sigui capaç d'arribar fins als 20° , en el codi s'ha reduït una mica la velocitat total del motor que es trobi en la posició més baixa. D'aquesta manera, l'UAV arriba a un angle més gran sense donar un valor molt gran a la velocitat base, la qual cosa significa una reducció del consum d'energia i una major estabilitat. El valor inicial assignat a la velocitat base és de $1185 \mu s$.

Un cop definit el valor de la velocitat màxima, el de la velocitat mínima, el del *delay*, el de Δt i el de la velocitat base, s'ha anat augmentant el guany proporcional fins a obtenir un valor que permeti a l'UAV arribar a l'angle consigna màxim establert (20°), mantenint en tot moment el valor del guany integral igual a zero.

També s'ha definit uns valors inicials pels límits de la integral que minimitzen l'efecte mencionat en l'annex C. Els valors inicials són:

- LP= 200.
- LN= -50

A continuació, partint del valor del guany proporcional obtingut anteriorment, s'ha anat augmentant el del guany integral i disminuint el del proporcional, fins a trobar uns valors que han permès obtenir els millors resultats possibles.

Finalment, a partir del valor definitius del guany proporcional i el del guany integral, s'han acabat de definir els valors dels límits de la integral, millorant els resultats obtinguts.

Els valors dels paràmetres que han donat els millors resultats són:

- $K_p = 0,4$.
- $K_i = 0,04$.
- $LP = 250$.
- $LN = -50$.
- Velocitat màxima del motor = $1230 \mu s$.
- Velocitat mínima del motor = $1160 \mu s$.
- $U_0 = 1175 \mu s$.

En les figures 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50 i 51 es poden veure els resultats obtinguts.

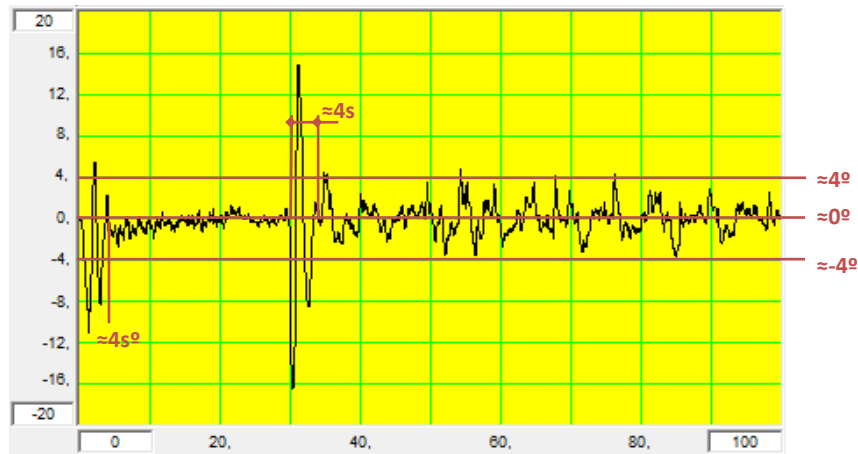


Figura 43. Angle (4°) vs Temps (10s), ($K_p=0,4$; $K_i=0,04$; Consigna = 0°).

En la figura 43, amb un angle consigna de 0° , les oscil·lacions van des d'uns -4° fins a uns 4° en el règim permanent, sense sobrepassar-los pràcticament en cap instant.

L'angle tarda uns 4 segons a estabilitzar-se des de l'instant inicial i, uns 4 segons després d'aplicar una pertorbació.

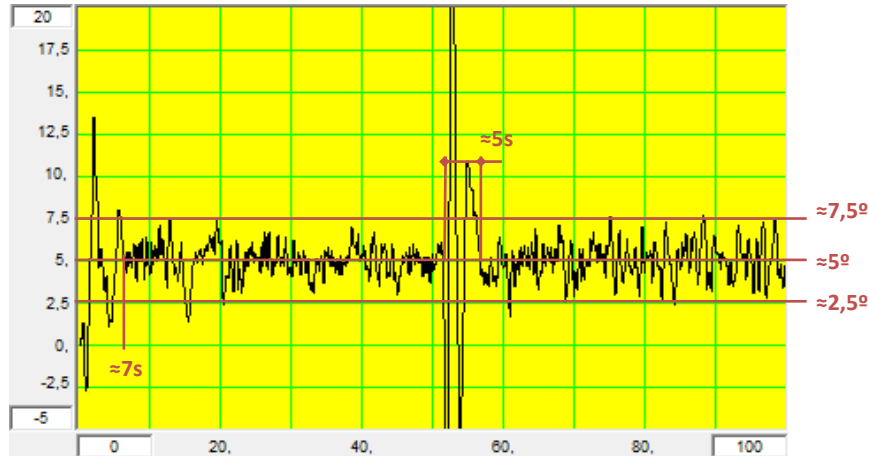


Figura 44. Angle (2,5°) vs Temps (10s/), ($K_p=0,4$; $K_i=0,04$; Consigna = 5°).

En la figura 44, amb un angle consigna de 5°, l'amplitud de les oscil·lacions és menor que en el cas anterior. Durant la major part del règim permanent, l'angle oscil·la per sota d'uns 7,5° i per sobre d'uns 2,5°, sense sobrepassar-los pràcticament en cap instant.

Després d'aplicar la pertorbació, els límits mencionats es mantenen, però es perd estabilitat.

L'angle tarda uns 7 segons a estabilitzar-se des de l'instant inicial i, uns 5 segons després d'aplicar una pertorbació.

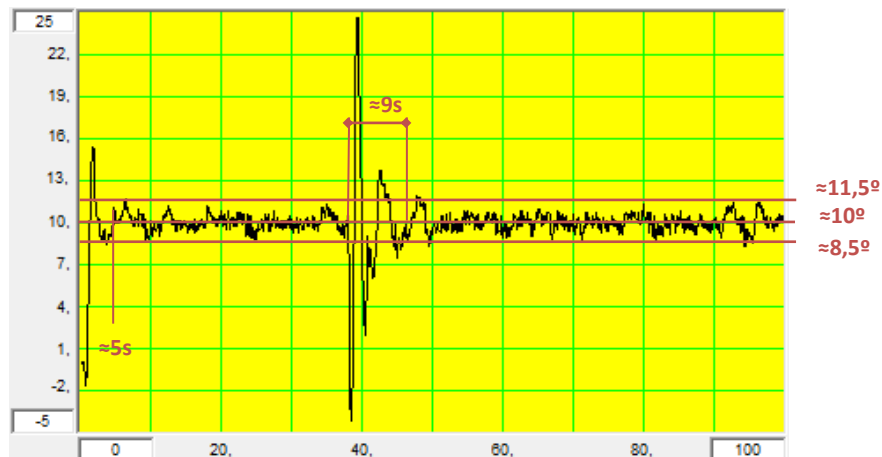


Figura 45. Angle (3°) vs Temps (10s/), ($K_p=0,4$; $K_i=0,04$; Consigna = 10°).

En la figura 45, amb un angle consigna de 10°, l'amplitud de les oscil·lacions és menor que en els casos anteriors. Durant la major part del règim permanent, l'angle oscil·la per sota d'uns 11,5° i per sobre d'uns 8,5°, sense sobrepassar-los pràcticament en cap instant.

L'angle tarda uns 5 segons a establitzar-se des de l'instant inicial i, uns 9 segons després d'aplicar una pertorbació.

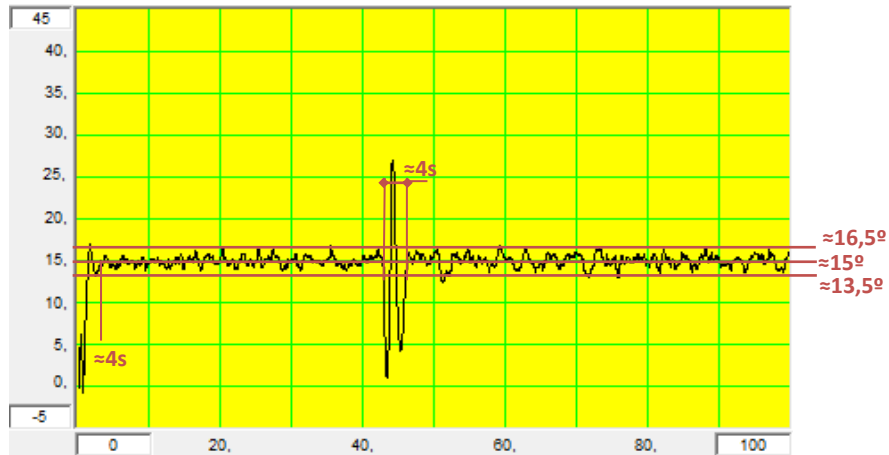


Figura 46. Angle (5°) vs Temps (10s), ($K_p=0,4$; $K_i=0,04$; Consigna = 15°).

En la figura 46, amb un angle consigna de 15° , l'amplitud de les oscil·lacions és molt petita. Durant la major part del règim permanent, l'angle oscil·la per sota d'uns $16,5^\circ$ i per sobre d'uns $13,5^\circ$, sense sobrepassar-los pràcticament en cap instant.

L'angle tarda uns 4 segons a establitzar-se des de l'instant inicial i, uns 4 segons després d'aplicar una pertorbació.

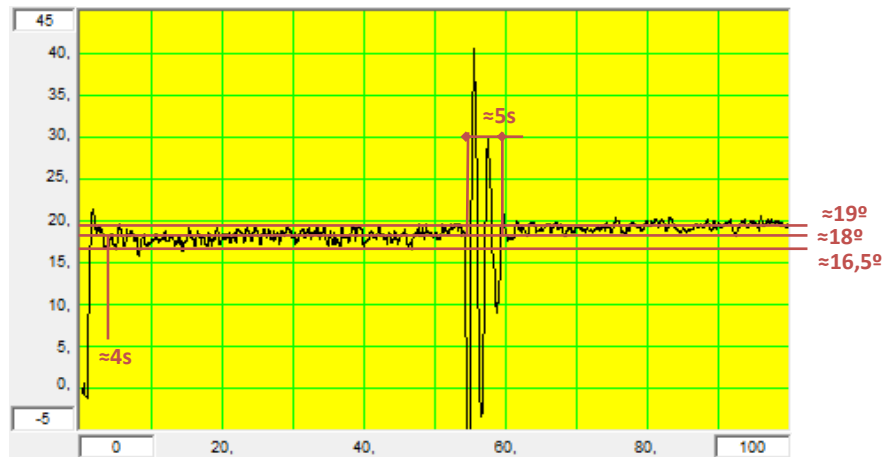


Figura 47. Angle (5°) vs Temps (10s), ($K_p=0,4$; $K_i=0,04$; Consigna = 20°).

En la figura 47, amb un angle consigna de 20° , sembla que s'hagi perdut precisió, però l'angle acaba arribant a l'angle consigna.

L'amplitud de les oscil·lacions també és bastant petita. En el tram abans de la pertorbació, per exemple, l'angle oscil·la al voltant d'uns 18° . Duran la major part

del règim permanent, l'angle oscil·la per sota d'uns 19° i per sobre d'uns $16,5^\circ$, sense sobrepassar-los pràcticament en cap instant.

L'angle tarda uns 4 segons a establitzar-se des de l'instant inicial i, uns 5 segons després d'aplicar una pertorbació.

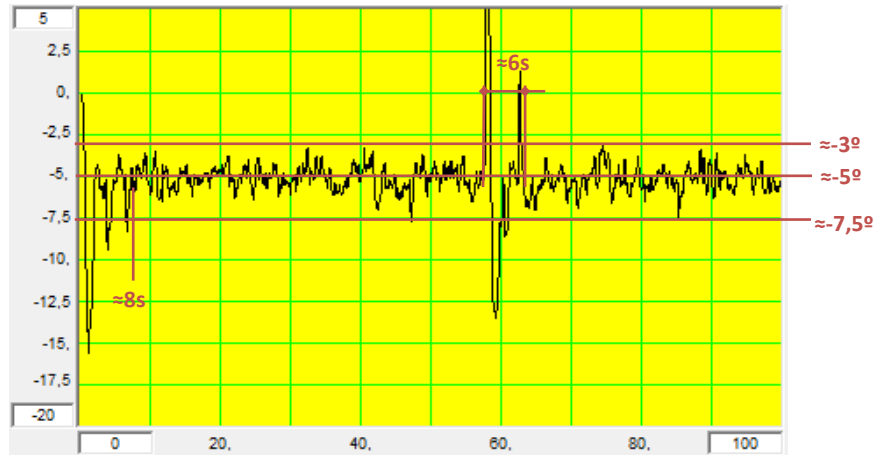


Figura 48. Angle ($2,5^\circ$) vs Temps (10s/), ($K_p=0,4$; $K_i=0,04$; Consigna = -5°).

En la figura 48, amb un angle consigna de -5° , l'amplitud de les oscil·lacions és similar a la de la figura 44 . Durant la major part del règim permanent, l'angle oscil·la per sota d'uns -3° i per sobre d'uns $-7,5^\circ$, sense sobrepassar-los pràcticament en cap instant.

L'angle tarda uns 8 segons a establitzar-se des de l'instant inicial i, uns 6 segons després d'aplicar una pertorbació.

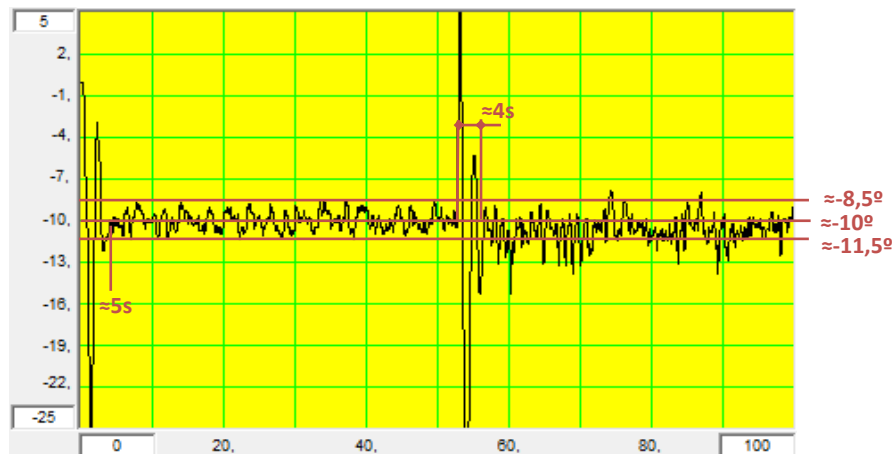


Figura 49. Angle (3°) vs Temps (10s/), ($K_p=0,4$; $K_i=0,04$; Consigna = -10°).

En la figura 49, amb un angle consigna de -10° , l'amplitud de les oscil·lacions, abans d'aplicar una pertorbació, és molt semblant a la e la figura 45. En aquest primer tram, durant la major part del règim permanent, l'angle oscil·la per sota

d'uns $-8,5^\circ$ i per sobre d'uns $-11,5^\circ$, sense sobrepassar-los pràcticament en cap instant. En canvi, després de la pertorbació la precisió i l'estabilitat empitjoren lleugerament.

L'angle tarda uns 5 segons a establitzar-se des de l'instant inicial i, uns 4 segons després d'aplicar una pertorbació.

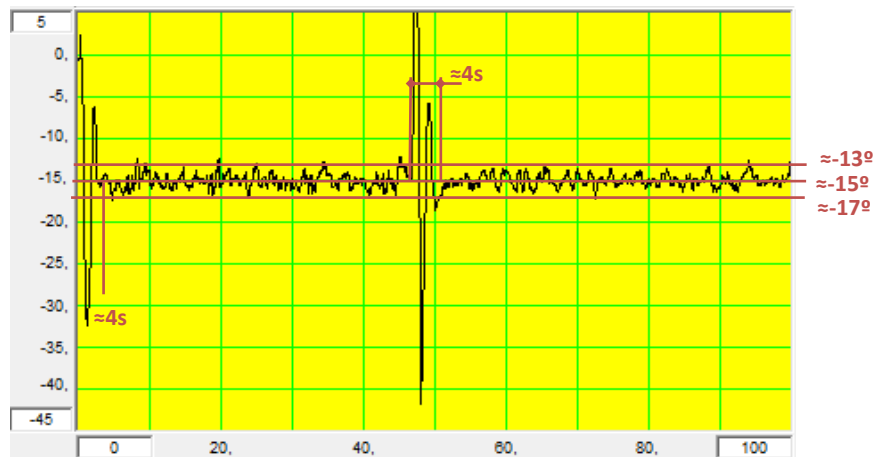


Figura 50. Angle (5°) vs Temps (10s/), ($K_p=0,4$; $K_i=0,04$; Consigna = -15°).

En la figura 50, amb un angle consigna de -15° , l'amplitud de les oscil·lacions és similar a la de la figura 46 . Durant la major part del règim permanent, l'angle oscil·la per sota d'uns -13° i per sobre d'uns -17° , sense sobrepassar-los pràcticament en cap instant.

L'angle tarda uns 4 segons a establitzar-se des de l'instant inicial i, uns 4 segons després d'aplicar una pertorbació.

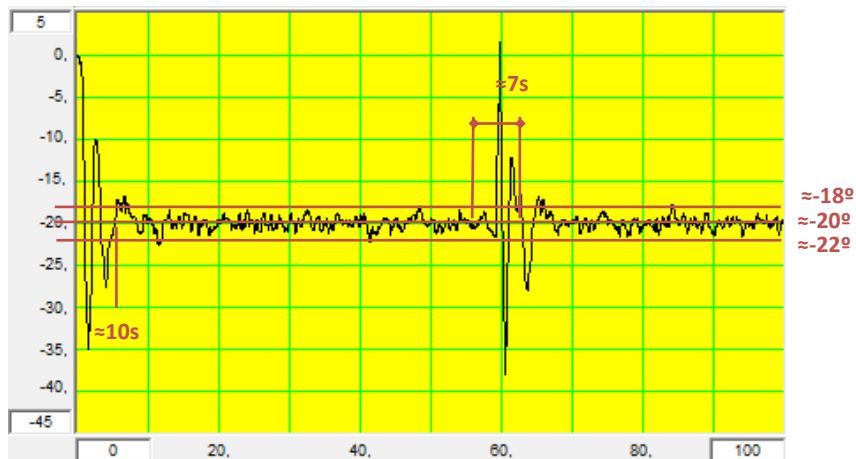


Figura 51. Angle (5°) vs Temps (10s/), ($K_p=0,4$; $K_i=0,04$; Consigna = -20°).

En la figura 51, amb un angle consigna de -15° , l'amplitud de les oscil·lacions és força petita. Durant la major part del règim permanent, l'angle oscil·la per sota d'uns -22° i per sobre d'uns -18° , sense sobrepassar-los pràcticament en cap instant.

L'angle tarda uns 10 segons a estabilitzar-se des de l'instant inicial i, uns 7 segons després d'aplicar una pertorbació.

Encara que les diferències siguin mínimes, en general, el sistema és lleugerament més inestable en els angles petits (en valor absolut). En les proves amb un motor era al contrari.

La precisió obtinguda és considerablement bona, ja que l'angle sempre oscil·la al voltant de la consigna. La falta de precisió inicial de la figura 46 segurament és deguda a un augment de la fricció, ja que, encara que li costi una mica, l'angle va augmentant fins arribar a l'angle consigna. S'ha de tenir en compte que l'estructura no és perfecta i poden passar coses d'aquest tipus.

El temps que tarda a estabilitzar-se l'angle des de l'instant inicial, a diferència de les proves amb un motor, no mostra cap tipus de patró de comportament. Tot i així, són temps acceptables.

En conclusió, s'ha aconseguit estabilitzar notablement l'UAV. L'amplitud de les oscil·lacions és mínima, exceptuant quan l'angle consigna és de 0° . La precisió aconseguida és molt bona. El temps que tarda en estabilitzar-se després d'aplicar una pertorbació no és massa gran, en la majoria dels casos va de 3 a 6 segons, encara que en alguna ocasió arriba a uns 9 segons.

És necessari tornar a mencionar que els valors entre els quals oscil·la l'angle i els temps que tarda en establitzar-se s'han de prendre com una referència.

El temps d'establització després d'una pertorbació depèn de la magnitud de la pertorbació aplicada. En els casos anteriors s'ha aplicat una pertorbació similar, però si la pertorbació es massa gran, l'UAV podria no establitzar-se.

7 Problemes d'implementació i solucions aportades

Durant la realització del projecte han anat apareixent algunes contrarietats que han posat en risc el compliment dels objectius, per la qual cosa, ha estat necessari buscar solucions.

Els principals problemes que han aparegut són les següents:

- Soroll electromagnètic

Durant l'inici de les proves experimentals es va observar que en determinades ocasions, els motors de l'UAV canviaven momentàniament de velocitat, fet que feia impossible el correcte funcionament de la planta experimental.

A través del "Monitor Serie" de la IDE d'Arduino es va comprovar que amb els motors engegats, la mesura de l'angle presentava soroll, ja que, en determinats instants marcava angles incorrectes. En canvi, amb els motors desconnectats la mesura de l'angle sempre era correcta. Per tant, aquest soroll era degut a la interferència electromagnètica dels cables de corrent sobre els cables de senyal.

La primera mesura que es va aplicar va ser trenar els cables de senyal i els de corrent per separat. Malgrat això, el soroll no va desaparèixer.

Finalment, la solució definitiva va consistir en calcular la mitjana aritmètica dels 10 últims angles obtinguts a partir de les lectures del sensor i, utilitzar aquest valor com si fos l'angle real (abans de passar pel Filtre Complementari).

- Pertorbacions externes

Les primeres proves experimentals es van realitzar amb els angles calculats directament a partir de les mesures de l'acceleròmetre.

Les pertorbacions externes alteren amb molta facilitat aquestes mesures, per tant, l'angle calculat únicament a partir de l'acceleròmetre presentarà soroll.

És degut a aquest soroll que els resultats obtinguts en les primeres proves experimentals, tot i no ser dolents del tot, no van ser suficientment bons.

La solució va ser aplicar un filtre anomenat Filtre Complementari que disminuís el soroll ocasionat per les pertorbacions externes, tal i com s'ha explicat anteriorment.

– Estructura de la planta experimental

L'estructura de la planta experimentals s'ha construït amb materials aprofitats, per tant, s'allunya una mica d'una estructura perfecta i ideal.

Aquest fet ha suposat una major dificultat a l'hora d'obtenir els resultats definitius i/o uns resultats millors.

Una possible solució seria construir l'estructura a partir de peces prefabricades. Ara bé, es tractaria d'un projecte diferent, ja que la intenció era utilitzar materials aprofitats.

8 Conclusions i recomanacions futures

8.1 Resum de característiques

Taula 10. Característiques principals de la planta experimental.

Llargada	500 mm
Amplada	400 mm
Alçada màxima	780 mm
Microcontrolador	Arduino UNO
Motors	EMAX MT 1806
Hèlix	5x3" (CW & CCW)
ESC	EMAX BLHeli Series 12A
Bateria	AeroEnergy 3S (11,1V), 2700mAh, 25C / 50C LiPo
Empenta màxima per motor	380g
Sensor	MPU-6050
Pes total	2,837 Kg

El muntatge definitiu de la planta és el següent:

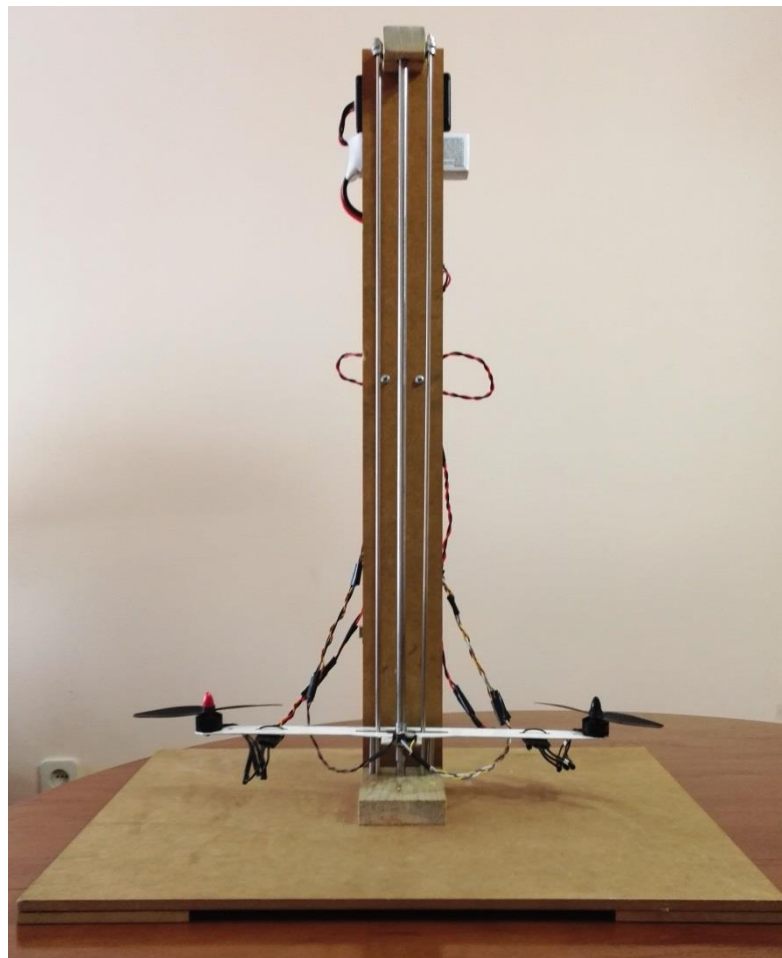


Figura 52. Planta experimental definitiva (Frontal).

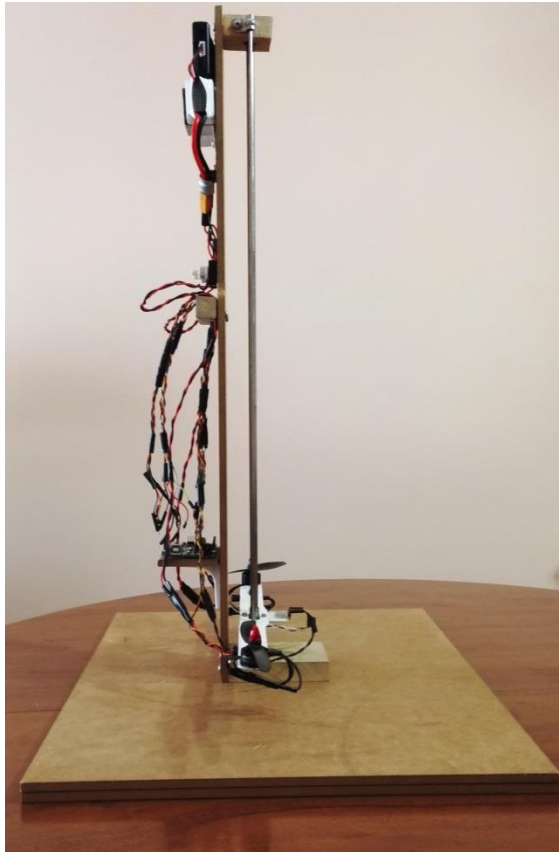


Figura 53. Planta experimental definitiva (Lateral).

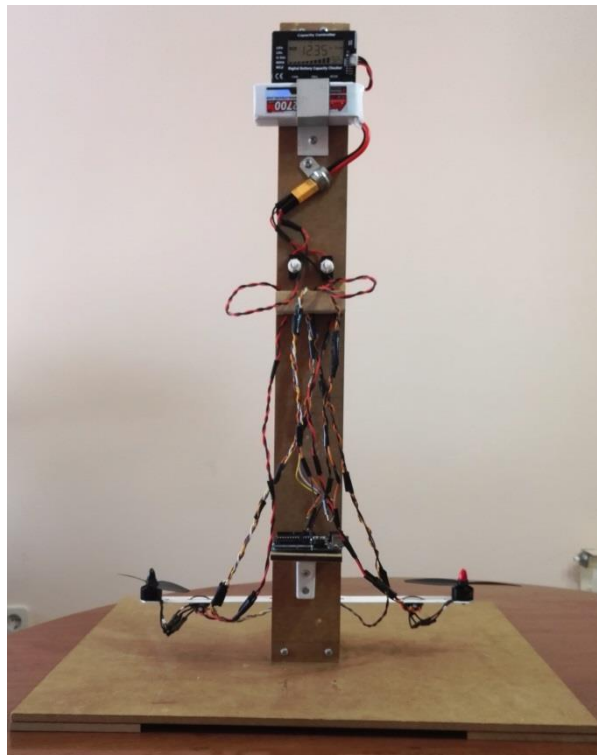


Figura 54. Planta experimental definitiva (Posterior).

8.2 Conclusions finals

Una vegada finalitzades totes les tasques requerides pel disseny i muntatge de la planta experimental d'assaig per UAVs se'n poden extreure les conclusions finals.

La construcció de l'estructura amb materials aprofitats no ha suposat un impediment per obtenir els resultats desitjats, encara que, ha dificultat una mica la seva obtenció.

El disseny estructural atorga dos graus de llibertat, el gir sobre l'eix X necessari pel control de la posició angular i, el desplaçament vertical.

Els materials escollits per fabricar l'estructura han estat capaços de suportar sense cap dificultat els esforços originats pels motors.

El pes de la planta és inferior al límit fixat per les especificacions i no suposa cap problema a l'hora de transportar-la.

Una altra característica de l'estructura a tenir en compte és la facilitat per reemplaçar qualsevol element estructural, la majoria estan units per cargols.

Pel que fa al disseny del hardware, s'han aconseguit integrar tots els components electrònics: microcontrolador, IMU, motors, bateria, ESCs i cables.

Els motors tenen una empenta suficient per vèncer la càrrega deguda al fregament i l'exercida pel pes de tots els elements que formen la part mòbil, el qual és de 169,49 g.

A més a més, els adaptadors i connectors mencionats en l'apartat 3.10 faciliten la substitució del components en cas d'averia.

Els algoritmes de control creats es poden considerar un èxit, ja que, s'ha aconseguit controlar la posició angular de l'UAV amb molt bons resultats. Cal destacar que els valors dels paràmetres s'han trobat experimentalment en unes condicions concretes, per tant, poden variar una mica depenent de les pertorbacions que actuïn sobre el sistema o de petites modificacions estructurals. Això implica ajustar els paràmetres en determinades situacions.

Així doncs, es pot arribar a la conclusió que s'ha complert amb l'objectiu, l'abast i les especificacions definides inicialment.

Per acabar, durant la realització del projecte s'han ampliat els coneixements sobre la programació en llenguatge C/C++ i també s'han adquirit coneixements nous, ja sigui sobre el funcionament d'un control PI o sobre el control dels motors brushless i ESCs. Sens dubte, aquests nous coneixements seran d'utilitat en projectes futurs.

8.3 Recomanacions futures

8.3.1 Tasques recomanades

La construcció i el disseny de la planta experimental han estat satisfactoris, però hi ha certs aspectes que es poden millorar o ampliar en un futur:

- Substitució del control PI per un control PID

El control PID és més sofisticat que el PI degut a l'acció de la part derivativa, la qual, s'anticipa a l'efecte de la part proporcional, permetent una estabilització més ràpida després d'una pertorbació [18] [19].

- Control de la posició angular i del moviment vertical

Una tasca a realitzar en un futur serà controlar els dos graus de llibertat que permet el disseny estructural realitzat en aquest projecte. És a dir, controlar el gir sobre l'eix X i el desplaçament vertical.

L'estructura de la planta ha estat dissenyada i construïda amb antelació permetent ambdós moviments, per tant, les modificacions estructurals seran mínimes.

Per poder controlar el moviment vertical, s'haurà de buscar un sensor capaç de mesurar distàncies.

Encara que no formés part del projecte, s'ha comprovat experimentalment que la combinació escollida de motors, ESCs, hèlixs i bateria és capaç d'aixecar la càrrega de 169,49 g exercida pel pes tots els elements que formen la part mòbil i la càrrega que suposa la fricció entre els diferents elements de l'estructura. Per tant, no serà necessari substituir-los.

A continuació, s'haurà de determinar la millor ubicació pel sensor en l'estructura, realitzant alguna modificació, si s'escau.

Una vegada situat el sensor en l'estructura, s'ha de connectar al microprocessador. L'Arduino UNO utilitzat en aquest projecte hauria de ser suficient, però seria convenient comprovar que tingui suficients pins i capacitat de càlcul per tal d'afegir el nou sensor.

L'últim pas serà modificar l'algoritme de control, també basat en un control PI o PID, que permeti controlar el desplaçament vertical i el gir de l'UAV.

8.3.2 Temps estimat per la realització de les tasques futures

La implementació de les dues tasques mencionades no suposa un gran canvi a nivell estructural o de hardware.

D'altra banda, suposa un gran canvi a nivell de programació. La substitució del control PI per un control PID implica afegir un tercer guany corresponent a la part derivativa. Tot i així, la principal dificultat radicarà en la modificació dels algorismes de control, ja que, no es tracta simplement d'afegir un algoritme de control pel desplaçament vertical, sinó que s'haurà de crear un nou algoritme que combini el control d'ambdós moviments.

Taula 11. Temps estimat per la realització de les tasques futures.

Tasca	Temps estimat (h)
Modificacions estructurals	5
Disseny del nou software	30
Proves experimentals	150
Anàlisi dels resultats i conclusions	10
Elaboració dels documents	40
Total	335

9 Aspectes ambientals i de seguretat

Encara que es tracti d'un projecte a petita escala, s'han tingut en compte diverses consideracions per tal de reduir l'impacte ambiental. També s'han proposat algunes mesures de seguretat durant la fase d'utilització de la planta.

9.1 Fase de construcció de la planta experimental

En la fase de construcció de l'estructura s'han utilitzat materials fàcilment reciclables com fusta, acer i alumini, en comptes de polímers, alguns dels quals no es poden reciclar.

A l'hora de comprar els components electrònics, s'ha tingut en compte la proximitat dels proveïdors de la zona on es realitza el projecte i, a més a més, s'han intentat comprar els components al mínim nombre de proveïdors possible [5] [6] [8]. L'objectiu d'aquestes mesures és minimitzar els efectes negatius provocats per les emissions del transport.

9.2 Fase d'utilització de la planta experimental

Aquesta fase fa referència al període de proves experimentals.

En aquesta fase, el principal impacte ambiental negatiu és degut al consum de l'electricitat de la xarxa en carregar la bateria.

Durant la fase d'utilització existeix la possibilitat que la bateria LiPO s'infla, la qual cosa pot suposar un perill important.

Les bateries LiPo es poden inflar per una descàrrega excessiva, per deixar-la carregant massa temps (sobrecàrrega), perquè s'ha avariat degut a algun cop, etc.

Si la bateria inflada no es desconnecta del corrent, continuarà inflant-se i, en el pitjor dels casos, explotarà o causarà un petit incendi.

D'altra banda, si es detecta que està inflada i es desconnecta del corrent a temps, s'aconsella submergir-la en un recipient que contingui aigua amb sal abundant durant varies hores. La sal dissolta en l'aigua reacciona amb els productes químics de la bateria forçant-ne la descàrrega. Un cop s'hagi descarregat la bateria ja no hi ha risc d'explosió o d'incendi.

Per reduir la possibilitat de sobrecàrrega durant el període de càrrega, s'ha seleccionat un carregador amb una senyal sonora que avisa quan la bateria està completament carregada.

9.3 Fase de desmantellament de la planta experimental

En aquesta última etapa, la mesura proposada per reduir l'impacte ambiental consisteix en separar tots els elements de la planta experimental, tant les parts estructurals com els components electrònics i portar-los a un punt net per tal de garantir-ne una gestió adequada.

10 Viabilitat econòmica

Aquest apartat s'ha realitzat a partir de la informació inclosa en el document del pressupost.

El cost total del projecte és de 4.971,59 €. Si la intenció és vendre el producte, el preu de venda seria, com a mínim el doble del seu cost, és a dir, de 9943,18 €, el qual és massa elevat.

No obstant això, si es fabrica la planta experimental en sèrie, el cost de les següents unitats es reduiria considerablement.

Les tasques de recerca d'informació, disseny de l'estructura, disseny del hardware, disseny del software, anàlisi dels resultats i conclusions i, elaboració dels documents no s'haurien de realitzar de nou.

La planta es experimental es construiria a partir del disseny realitzat en aquest projecte. El temps de construcció en les següents unitats seria inferior gràcies a l'experiència adquirida en construir la planta original. Aquest temps es podria veure reduït fins a un 50% del temps dedicat a construir la primera planta.

S'utilitzarien els mateixos algorismes de control en totes les unitats, només seria necessari realitzar un petit calibratge en cada cas. El temps dedicat a aquest calibratge seria d'un 10% de les hores dedicades a les proves experimentals.

Taula 12. Nou pressupost de recursos humans.

Tasca	Temps estimat (h)	Cost per hora (€/h)	Cost estimat (€)
Construcció de la planta experimental	10	15€/h	150
Calibratge del codi	13	18€/h	234
Total	23		384

A diferència del pressupost de recursos humans, el pressupost del hardware romandria igual, ja que els elements necessaris per muntar la planta experimental són els mateixos en totes les unitats.

El software utilitzat també seria el mateix, per tant, el cost d'aquest tampoc variaria.

Taula 13. Nou pressupost total.

Concepte	Cost estimat (€)
Pressupost de Recursos Humans	384
Pressupost del hardware	276,59
Pressupost del software	0
Total	660,59 €

Per tant, el preu de venda de les següents plantes experimentals seria d'uns 1322 €.

Es tracta d'un preu assequible per centres com instituts o universitats tècniques, tenint en compte que es tracta d'una eina que resultaria molt útil per l'aprenentatge del control PI i del llenguatge C/C++.

La planta experimental s'entregaria juntament amb el codi definitiu, d'aquesta manera els usuaris podran veure els efectes que causa la modificació dels diferents paràmetres en el comportament de l'UAV.

El benefici per unitat seria de 661,41 €. Venent només 8 unitats s'obtindrien beneficis respecte el cost de la planta original, per tant, es pot arribar a la conclusió que es tracta d'un projecte viable econòmicament.

11 Bibliografia

[1] Construmatica.com. (2016). *Madera | Construpedia, enciclopedia construcción.* [En línia] Disponible a: <http://www.construmatica.com/construpedia/Madera> [Data de consulta: febr. 2016].

[2] Elconstructorcivil.com. (2016). *PROPIEDADES DE LA MADERA: Variabilidad en Resistencia. | Constructor Civil.* [En línia] Disponible a: <http://www.elconstructorcivil.com/2011/02/propiedades-de-la-madera-variabilidad.html> [Data de consulta: febr. 2016].

[3] Cesarmetalugista.blogspot.com.es. (2016). *Metalurgia y Materiales: ALEACIONES DE ALUMINIO.* [En línia]. Disponible a: <http://cesarmetalugista.blogspot.com.es/p/aleaciones-de-aluminio.html> [Data de consulta: febr. 2016].

[4] Anon, (2016). [En línia] Disponible a: <http://roble.pntic.mec.es/jlec0009/pdfs/UT02%20Traccion.pdf> [Data de consulta: febr. 2016].

[5] Rctecnic.com. (2016). *Rc Tecnic - Comprar drones - RCTecnic.* [En línia] Disponible a: <http://www.rctecnic.com/> [Data de consulta: febr. 2016].

[6] Arduex. (2016). *Arduino | Sensores | Shields | Componentes electrónicos.* [En línia] Disponible a: <https://www.arduex.com/> [Data de consulta: març 2016].

[7] Invensense.com. (2016). *MPU-6050 | InvenSense.* [En línia] Disponible a: <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/> [Data de consulta: abr. 2016].

[8] Tienda.bricogeek.com. (2016). *Tienda de Electrónica, Arduino y Componentes electrónicos - Tienda BricoGeek.com.* [En línia] Disponible a: <http://tienda.bricogeek.com/> [Data de consulta: març 2016].

[9] Arduino.cc. (2016). *Arduino - ArduinoBoardUno.* [En línia] Disponible a: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno> [Data de consulta: març 2016].

[10] Arduino.cc. (2016). *Arduino - ArduinoBoardMega2560*. [En línia] Disponible a: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560> [Data de consulta: març 2016].

[11] Arduino.cc. (2016). *Arduino - Software*. [En línia] Disponible a: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software> [Data de consulta: març 2016].

[12] Arduino.cc. (2016). *Arduino - Environment*. [En línia] Disponible a: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Environment> [Data de consulta: març 2016].

[13] Robologs.net. (2016). *Programación de un ESC con Arduino – robologs*. [En línia] Disponible a: <http://robologs.net/2016/02/01/programacion-de-un-esc-con-arduino/> [Data de consulta: abr. 2016].

[14] Mechatronics Project Site. (2012). *ESC Calibration & Programming*. [En línia] Disponible a: <http://robots.dacloughb.com/project-2/esc-calibration-programming/> [Data de consulta: abr. 2016].

[15] Robologs.net. (2014). *Tutorial de Arduino y MPU-6050 – robologs*. [En línia] Disponible a: <http://robologs.net/2014/10/15/tutorial-de-arduino-y-mpu-6050/> [Data de consulta: abr. 2016].

[16] Pedley, M. (2013). *Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer*. [En línia] Disponible a: http://www.nxp.com/files/sensors/doc/app_note/AN3461.pdf [Data de consulta: abr. 2016].

[17] Colton, S. (2007). *The Balance Filter*. [En línia] Disponible a: http://d1.amobbs.com/bbs_upload782111/files_44/ourdev_665531S2JZG6.pdf [Data de consulta: abr. 2016].

[18] Mazzone, V. (2002). *Controladores PID*. [En línia] Disponible a: <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf> [Data de consulta: maig 2016].

[19] Morilla García, F. (2007). *El controlador PID*. [En línia] Disponible a: <http://www.dia.uned.es/~fmorilla/MaterialDidactico/EI%20controlador%20PID.pdf> [Data de consulta: maig 2016].