



FACULTAT  
DE CIÈNCIES  
I TECNOLOGIA

UVIC | UVIC·UCC

UNIVERSITAT DE VIC

TREBALL FINAL DE GRAU

GRAU EN ENGINYERIA MECATRÒNICA

---

**Estabilitzador de 3 eixos de  
càmeres de fotografia  
intercanviable amb telèfons mòbils**

---

*Autor:*

Marc Masnou Cruxens

*Tutors:*

Dr. Moisès Serra-Serra

Dr. Pere Martí Puig

7 de juny de 2020

# Agraïments

Dono les gràcies als meus tutors per tot el suport que m'han donat al llarg del projecte, per mostrar un gran interès en el treball i l'evolució d'aquest, i involucrar-se des del principi fins al final per solucionar tots els problemes que han sorgit pel camí i per transmetre'm nous coneixements i eines que, sense cap mena de dubte, seran útils pel meu futur.

Tanmateix vull agrair a en Soufiane Ben l'esforç i temps dedicat a fer reparacions a les plaques controladores que han calgut durant el curs del projecte i per donar-me consells per solucionar alguns problemes relacionats amb l'electrònica i programació. I per descomptat, vull donar les gràcies a la meva família pel suport, voluntat, consells i paciència que han tingut aquest temps que m'ha servit de d'ajuda per mantenir la iniciativa de tirar endavant el projecte.

Per últim, agraeixo i valoro les hores d'estudi i treball extres amb els companys del grau i en especial a l'Òscar Allué i en Patrick Marchante que, malgrat els moments tensos que hem viscut al llarg d'aquests quatre anys, ens han servit per trobar el camí correcte.

# Resum

Les càmeres de fotografia son eines per capturar moments amb una resolució cada any superior. L'evolució d'aquests dispositius fa que s'eliminïn les imperfeccions de generacions anteriors fent que les imatges i vídeos capturats per professionals ens sorprenguin cada vegada més. Tot i així, existeix una imperfecció que una càmera per si sola no pot solventar, i aquesta és el moviment i tremolor dels nostres braços. Per això al llarg dels anys s'han desenvolupat dispositius auxiliars que ajuden a compensar aquests moviments, fins arribar als dispositius com el que es pretén realitzar en aquest treball. Aquest treball consisteix en dissenyar, simular i fabricar un estabilitzador de tres eixos per a càmeres esportives i telèfons mòbils. El procés comença des de sota, buscant un model matemàtic per desxifrar quin és el comportament d'un dispositiu d'aquesta mena, això s'aconsegueix mitjançant l'estudi de la cinemàtica i la dinàmica d'un model tipus. Un cop estudiada la part mecànica fonamental, es realitza un model mecatrònic, que consisteix en fer un disseny complet del prototip tenint en compte les parts mecàniques i electròniques. Per realitzar aquesta tasca s'utilitza el programa anomenat PTC Creo que permet modelar i simular tot tipus de mecanismes. Gràcies a aquest software es pot arribar al disseny final de les peces, obtenint les propietats físiques d'aquestes com per exemple, el pes i les inèrcies. Aquestes dades són fonamentals pel disseny del sistema compensador que es realitza posteriorment amb Matlab. Durant el procés de disseny de les peces mecàniques, es realitza paral·lelament la cerca i selecció de components electrònics tenint en compte les limitacions d'espai i moviments del dispositiu, al mateix temps que també es dimensionen les parts mecàniques d'acord amb les limitacions dels components electrònics, com per exemple, els motors. El mètode utilitzat per dissenyar el sistema compensador s'anomena LQR, que és un algoritme matemàtic format per unes equacions d'estat basades en les propietats dinàmiques i cinemàtiques del sistema de l'estabilitzador. Normalment un sistema d'aquestes característiques es realitzaria amb compensadors del tipus PID, però per aquest projecte s'ha volgut apostar per una solució equivalent. Un cop fabricat i assemblet el prototip, es procedeix a realitzar una sèrie de proves i comprovacions per tal d'esbrinar si el model matemàtic trobat és correcte i per trobar desviacions o mal comportaments, a part també per comprovar si el sistema compensador és aplicable i funciona correctament o cal ajustar-lo.

# Abstract

Photographic cameras are tools for capturing moments with an increasing resolution each year. The evolution of these devices remove the imperfections that other generation cameras couldn't, making the images and videos filmed by professionals surprise us more and more. However, there's an imperfection that a camera let alone can't remove, and that is the movement and shakes produced by our arms. That's the reason why over the years, auxiliary devices have been developed to help compensate these movements, until producing the type of devices similar to the one intended to be performed in this project.

This project aims to design, simulate and manufacture a three-axis gimbal stabilizer for sports cameras and mobile phones. The process starts from the basics, developing a mathematical model to decipher the behaviour of such a device by studying the kinematics and the dynamics of this type of model. Once the fundamental mechanics are studied, a Mechatronic model is made, which consists of making a complete design of the prototype taking into account the mechanical and electronic parts. To perform this task, a program called PTC Creo is used. This software allows the user to design and simulate all kind of mechanisms. With this software it's also possible to develop the final parts of the model, obtaining their physical data like their mass or inertia. This data is fundamental to design the compensating system developed later with Matlab. A parallel research and selection of electronic parts is performed alongside with the design of the mechanical parts of the gimbal having into account the limitations in space and movement of the device. In the same way, the mechanical parts are designed according to the limitation of the electronic parts such as the motors.

To develop the compensating system, the LQR method is used. This method is a mathematical algorithm formed by some state equations based on the kinematic and dynamic properties of the gimbal's system. Usually, this type of systems would use PID regulators, but in this project, an aim to use an equivalent method was chosen. Once the prototype is built, the next step is to perform several tests and verifications to find out if the mathematical model is correct and to find deviations or an incorrect behaviour, and finally, to verify if the compensating system design is applicable and works correctly or needs to be tuned.

# Índex

<b>Glossari</b>	<b>9</b>
<b>Acrònims</b>	<b>10</b>
<b>1 Introducció</b>	<b>11</b>
1.1 Objectius . . . . .	12
1.2 Estructura del projecte . . . . .	13
1.3 Estat de l'art . . . . .	14
<b>2 Modelització matemàtica</b>	<b>16</b>
2.1 Propietats de l'estabilitzador . . . . .	16
2.1.1 Mecànica . . . . .	16
2.1.2 Electrònica . . . . .	18
2.2 Esquema del sistema . . . . .	18
2.3 Cinemàtica de l'estabilitzador . . . . .	19
2.3.1 Matrius de rotació i transformació . . . . .	20
2.4 Dinàmica de l'estabilitzador . . . . .	22
2.4.1 Obtenció del Jacobià . . . . .	22
2.4.2 Energies de l'estabilitzador . . . . .	22
2.4.2.1 Energia Cinètica . . . . .	22
2.4.2.2 Energia Potencial . . . . .	23
2.4.3 Equació de Lagrange . . . . .	23
2.4.4 Model complet . . . . .	24
<b>3 Disseny 3D</b>	<b>25</b>
3.1 Peces Predissenyades . . . . .	25
3.2 Disseny i característiques de les peces . . . . .	26
3.2.1 Braç Yaw . . . . .	26
3.2.2 Braç Pitch . . . . .	26
3.2.3 Braç Roll . . . . .	27
3.2.4 Bateria . . . . .	28
3.2.5 Placa Controladora . . . . .	28
3.2.6 MPU6050 . . . . .	29
3.2.7 Compartiment electrònic . . . . .	30
3.2.8 Tapa del compartiment electrònic . . . . .	30
3.2.9 Mànc . . . . .	31
3.2.10 Suports pels dispositius . . . . .	32
3.2.11 Dispositius . . . . .	32
3.3 Acoblament de les peces . . . . .	33

3.4	Balanceig aproximat de l'estabilitzador . . . . .	34
3.5	Propietats físiques dels cossos . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Simulació amb Matlab i Simulink</b>	<b>36</b>
4.1	Obtenció de les equacions d'estat amb Matlab . . . . .	36
4.1.1	Obtenció del sistema linealitzat. . . . .	37
4.2	Model de blocs amb Simulink . . . . .	37
4.2.1	Model Simulink convencional . . . . .	37
4.2.1.1	Primera realimentació . . . . .	38
4.2.1.2	Segona realimentació . . . . .	39
4.2.2	Model Simscape Multibody . . . . .	41
4.2.2.1	Bloc realitzat amb Multibody . . . . .	42
4.2.2.2	Resultat de la simulació . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Tests i modificacions</b>	<b>47</b>
5.1	Construcció del prototip . . . . .	47
5.1.1	Acoblament del sensor . . . . .	47
5.1.2	Acoblament dels motors . . . . .	48
5.1.3	Acoblament del compartiment electrònic . . . . .	48
5.1.4	Acoblament del mànec . . . . .	49
5.1.5	Acoblament dels dispositius . . . . .	50
5.1.6	Prototip final . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Resultats</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>Conclusions</b>	<b>53</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>55</b>
<b>A</b>	<b>Fricció dels motors</b>	<b>56</b>
<b>B</b>	<b>Obtenció <math>C_{ij}</math></b>	<b>57</b>
<b>C</b>	<b>Obtenció dels valors de les forces de fricció dels motors</b>	<b>58</b>
<b>D</b>	<b>Obtenció de les matrius del model LQR</b>	<b>59</b>

# Índex de figures

Figura 1.1	Giroscopi d'anells estabilitzant una brúixola . . . . .	11
Figura 2.1	Cinemàtica d'un estabilitzador amb tres articulacions de re- volució . . . . .	16
Figura 2.2	Diagrama de flux general del sistema . . . . .	18
Figura 2.3	Criteri de Denavit-Hartenberg . . . . .	19
Figura 3.1	Vistes dièdriques del Braç de l'eix Yaw . . . . .	26
Figura 3.2	Vistes dièdriques del Braç de l'eix Pitch . . . . .	27
Figura 3.3	Vistes dièdriques del Braç de l'eix Roll . . . . .	27
Figura 3.4	Disseny simplificat de la bateria . . . . .	28
Figura 3.5	Model CAD de la placa, model extret de Gra [2020] . . . . .	28
Figura 3.6	(a) Model en CAD de la IMU MPU6050, model extret de Gra [2020] (b) Visualització de la col·locació de la MPU6050 . . . . .	29
Figura 3.7	Model CAD del compartiment de components electrònics . . . . .	30
Figura 3.8	Model CAD de la tapa del compartiment electrònic . . . . .	30
Figura 3.9	Model CAD del mànec de l'estabilitzador . . . . .	31
Figura 3.10	Visualització en el programa d'FDM del suport que es vol evitar . . . . .	31
Figura 3.11	Models dels suports per als dispositius . . . . .	32
Figura 3.12	Models dels dispositius . . . . .	32
Figura 3.13	Vistes de les posicions principals de l'estabilitzador . . . . .	33
Figura 3.14	Execució i resultats d'una simulació dinàmica amb PTC Creo . . . . .	34
Figura 3.15	Exemple d'obtenció de les propietats del conjunt que forma el Braç Roll . . . . .	35
Figura 4.1	Model complet de Simulink . . . . .	38
Figura 4.2	Primera realimentació . . . . .	38
Figura 4.3	Segona realimentació . . . . .	39
Figura 4.4	Evolució dels valors de posició de YAW apropant-se al valor objectiu . . . . .	40
Figura 4.5	Evolució dels valors de posició de PITCH apropant-se al valor objectiu . . . . .	40
Figura 4.6	Evolució dels valors de posició de ROLL apropant-se al valor objectiu . . . . .	40
Figura 4.7	Model complet de multibody . . . . .	41
Figura 4.8	Contingut del bloc Multibody . . . . .	42
Figura 4.9	Contingut del bloc Multibody . . . . .	42
Figura 4.10	Resultats de la simulació amb l'eina Multibody . . . . .	44
Figura 4.11	Exemple de moviment del model en Multibody . . . . .	44

Figura 4.12	Evolució posició de l'angle Yaw . . . . .	45
Figura 4.13	Evolució posició de l'angle Pitch . . . . .	45
Figura 4.14	Evolució posició de l'angle Roll . . . . .	46
Figura 5.1	Compartiment del sensor i tapa per protegir-lo . . . . .	47
Figura 5.2	Vistes del muntatge dels motors i pas dels cables. . . . .	48
Figura 5.3	Vista de l'interruptor incorporat com a millora. . . . .	48
Figura 5.4	Vista de la placa i la bateria muntades al compartiment . . . . .	49
Figura 5.5	Vistes de les parts que formen el mànec i la tapa. . . . .	49
Figura 5.6	Vista de la femella ensotada al suport. . . . .	50
Figura 5.7	Vista del muntatge final del prototip. . . . .	50
Figura A.1	Taula de determinació de la fricció en motors DC. . . . .	56



# Glossari

**Brushless** Motor de corrent continua sense escombretes. 12, 14, 16, 25

**Compensador** Aparell que compensa una diferència o variació. 13

**Matlab** Segons Mathworks, Matlab és un software per ordinador que combina un entorn d'escriptori perfeccionat per a l'anàlisi iteratiu i els processos de disseny amb un llenguatge de programació que expressa les matemàtiques de matrius i arrays directament.. 3, 4, 9, 14, 23, 24, 35–37, 39

**PTC Creo** És un software CAD utilitzat per modelar peces mecàniques i realitzar simulacions . 3, 4

**Simulink** Programa de Matlab per simular sistemes. 12–14, 36, 37

**Teoria de control** Camp interdisciplinari entre l'enginyeria i les matemàtiques que estudia el comportament de sistemes dinàmics. 12

# Acrònims

**CAD** Disseny assistit per ordinador. 7, 28–31, 37, 41

**DoF** Degrees of Freedom, Graus de llibertat. 19

**IMU** Inertial measurement unit, Unitat de mesura inercial. 15, 25, 29

**LQR** Linear-Quadratic Regulator. 3, 4, 37, 39

**mAh** Miliampers hora, representa la quantitat d'energia que una font pot proporcionar a un dispositiu durant una hora. 28

**SCC** Sistema de coordenades cartesianes. 19

# Capítol 1

## Introducció

Un estabilitzador d'imatge és un dispositiu capaç de mantenir una càmera videogràfica o fotogràfica en estat d'equilibri amb l'horitzó desferent-se'n de moviments bruscs i/o vibracions per obtenir un resultat de vídeo o imatge cinemàtic i lliure de moviments no desitjats. El concepte de la tecnologia emprada en aquesta mena de dispositius es remunta a l'era dels antics grecs on, en lloc d'utilitzar motors i controladors, s'utilitzaven tècniques per fer el sistema totalment mecànic, com per exemple, un giroscopi d'anells. Aquests mecanismes eren capaços de mantenir l'objecte que suporta de manera que els moviments d'aquests suports no influeixen a la posició de l'objecte, és a dir, l'objecte es manté independent a la rotació externa dels seus suports.



Figura 1.1: Giroscopi d'anells estabilitzant una brúixola  
Font: <https://bit.ly/giroscopi>

Aquests giroscopis no es basen en la cinematografia sinó que aquesta ha adoptat les bases emprades en altres àmbits com l'aeronàutica. Un giroscopi es podia fer servir per a estabilitzar la brúixola d'un vaixell, ja que a alta mar els moviments de

vaivé són constants i sense una compensació d'aquests moviments era molt complicat obtenir mesures de localització precises. Per entendre millor com s'aplica aquesta tecnologia en un dispositiu modern, es pot comparar amb el sistema nerviós d'una au. Les aus posseeixen un sistema nerviós molt més desenvolupat que el dels mamífers, fet que les permet una integració d'estímuls i control al moment de desenvolupar el vol. Una au és capaç de mantenir el cap mirant a un punt fix compensant els moviments del seu cos a l'hora de volar. Un estabilitzador modern doncs, és capaç de mantenir la càmera enfocant a un punt fix compensant els moviments de la seva base generats a l'hora d'utilitzar-lo. Amb el temps, la tecnologia ha evolucionat fins al punt que s'ha arribat a crear estabilitzadors d'imatge amb motors Brushless i controladors molt ràpids i eficients, fet que dona unes prestacions en l'àmbit cinematogràfic excel·lents. Un dispositiu d'aquesta mena és un molt bon exemple de teoria de control, ja que és un sistema que ha de compensar la rotació no només en un eix, sinó en 3 (Yaw, Pitch, Roll), que estan formats per components molt freqüents en el mercat i no excessivament cars. El problema està doncs, en la integració de tots aquests components i la corresponent programació i configuració del controlador. Aquesta és la part més important a desenvolupar en aquest projecte i la part que més interès hi ha pel que fa a aprenentatge. La motivació principal d'aquest projecte és ampliar i consolidar els coneixements de l'assignatura Control Discret, fent-ho així en un àmbit d'aplicació on hi ha un interès i afició personal, com és el de la fotografia. Aconseguir realitzar un dispositiu d'aquesta mena resulta en un gran aprenentatge i domini del camp mecatrònic i suposa una gran satisfacció i orgull ser capaç de crear i entendre com funciona un estabilitzador de càmeres fotogràfiques.

## 1.1 Objectius

Les fites per a aquest projecte son:

- Modelar, simular i crear un dispositiu mecatrònic fabricat majoritàriament amb fabricació additiva, que sigui capaç de reaccionar als moviments de l'usuari mitjançant 3 motors en eixos diferents, amb la finalitat d'estabilitzar una càmera fotogràfica en posició horitzontal.
  - Aplicar els conceptes apresos a l'assignatura teoria de control, així dissenyant un sistema capaç de compensar els moviments de l'usuari de la càmera.
  - Fer un model matemàtic mitjançant les equacions cinemàtiques corresponents que representi el moviment i comportament de l'aparell.
  - Generar un model en Simulink on es pugui realitzar totes les accions necessàries per a la correcta configuració del sistema compensador.
  - Generar un model CAD a escala real on es representin totes les peces modelables que formaran part del prototip final
  - Construir l'estabilitzador amb les peces dissenyades i fabricades amb FDM.

I les restriccions i prestacions mínimes a assolir son:

- Simplicitat a l'hora de dissenyar el producte, és a dir, obtenir un prototip final amb el mínim de peces i màxima robustesa.
- Obtenció de resultats de mitjans obtinguts amb una càmera muntada a l'estabilitzador amb un nivell de fluïdesa notable.
- Dissenyar el dispositiu de manera que sigui portable fàcilment.
- Selecció de components electrònics compatibles amb la mateixa font d'alimentació.
- El dispositiu ha de tenir una autonomia aproximada de 2h o més.

## 1.2 Estructura del projecte

Aquest document segueix un ordre específic per tal d'encaminar correctament un projecte mecatrònic com aquest, començant per l'anàlisi teòrica i acabant per la part pràctica. Cada capítol engloba una part del projecte tractant tots els camps de la Mecatrònica, des d'una anàlisi i creació d'un model matemàtic del dispositiu fins a la fabricació de l'estabilitzador. Per tal d'organitzar correctament el projecte, s'ha optat per la Metodologia de Disseny Mecatrònic. En aquest projecte es realitza una recerca d'informació intensa de l'estat de l'art per determinar quins són els camins possibles per realitzar el projecte. Posteriorment s'entra en una fase de desenvolupament en paral·lel de la realització d'un model matemàtic, un model 3D i una simulació. Aquests tres processos depenen entre ells, per tant, encara que en aquest document s'anomenin com a capítols individuals, es podrà observar una clara relació entre ells. A continuació es mostra de forma esquemàtica el contingut dels diferents capítols:

- El capítol 2 explica com s'han obtingut les diferents funcions que descriuen el model matemàtic d'un estabilitzador de tres eixos.
- El capítol 3 explica com s'ha realitzat el disseny mecatrònic per combinar les peces mecàniques amb les peces electròniques en el mateix disseny.
- El capítol 4 mostra com s'ha construït un model de Simulink i l'eina Multibody i s'ha verificat el compensador pel moviment realitzant un seguit de simulacions.
- El capítol 5 explica les diferents fases de tests i modificacions que es realitzen durant el període del treball.
- El capítol 6 exposa els resultats del projecte.
- El capítol 7 explica les conclusions que s'han tret d'aquest projecte.

A més, la memòria es complementa amb els següents apèndixs:

- L'apèndix A mostra una taula utilitzada per obtenir valors aproximats per al càlcul de la fricció estàtica i viscosa dels motors de corrent contínua sense escobetes.

- L'apèndix B mostra els càlculs realitzats amb Matlab per trobar els valors  $C_{ij}$  de la matriu  $C$ .
- L'apèndix C mostra el codi de Matlab que s'ha realitzat per generar el vector de Fricció dels motors.
- L'apèndix D mostra el codi de Matlab utilitzat per calcular les matrius  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  del model LQR.

### 1.3 Estat de l'art

Existeixen diferents solucions al problema el qual tracta aquest projecte i moltes combinacions d'estratègies. Després d'una intensa recerca sobre els estabilitzadors d'imatge, s'han trobat dos articles interessants que parlen sobre dos enfocaments a projectes similars al d'aquest document. El primer de tots fa referència a l'article Edlund [2015] i fa una proposta de definició del sistema mitjançant el conveni de Denavit-Hartenberg. Aquest conveni s'utilitza per seleccionar sistemes de coordenades de referència en l'àmbit de la robòtica i defineix una sèrie de passos a seguir per establir els sistemes de coordenades d'un sistema multi cos. El primer punt és alinear l'eix  $Z$  amb l'eix de rotació de la unió (articulació) entre els dos cossos, seguidament, l'eix  $X$  queda paral·lel al segment que defineix entre dues articulacions no intersectants ( $Z$  paral·leles), i finalment la  $Y$  s'escull mitjançant la regla de la mà dreta. Per l'altra banda, l'article Johansson [2012] no utilitza cap criteri estrictament definit però utilitza un mètode per definir el model matemàtic on utilitza el model de Lagrange igual que l'altre cas però amb variacions que fa que conceptualment sigui més difícil d'entendre.

Després de fer una petita recerca, es podria dir que respecte a selecció de motors, els motors *Brushless* són la millor opció gràcies la gran quantitat d'avantatges que presenten i la gran quantitat de projectes d'aquesta mena que els utilitzen. El bloc més important d'aquesta secció però és la simulació del programa de control. A l'hora de dissenyar un dispositiu d'aquesta mena, cal assegurar que el disseny és vàlid i cal tenir clares les directrius a seguir, per tant, aconseguir un model virtual del dispositiu dona una visió molt més amplia del projecte i el procediment a seguir, també fa molt més senzilla la tasca de detecció d'errors. L'eina principal que s'utilitza per realitzar aquesta tasca és Simulink. Simulink és un entorn de programació visual que funciona sobre l'entorn de programació Matlab. És un entorn de programació de més alt nivell que el Matlab. Amb Simulink es pot generar, per exemple, un sistema de control automàtic que és precisament el que es necessita per realitzar aquest projecte. Amb Simulink la programació va per blocs, per tant un dels blocs podria ser, per exemple, un bloc de processament de senyal, com ara un filtre de Kalman. El filtre de Kalman és un algoritme utilitzat per identificar l'estat ocult d'un sistema dinàmic lineal mitjançant medicions de senyals en temps real (per exemple d'un sensor inercial), les medicions de l'estat anterior al present i una matriu d'incertesa. Aquest filtre és molt utilitzat en robòtica, però el seu funcionament és pesat i requereix molta potència i velocitat de càlcul del controlador. Una opció equivalent al filtre de Kalman és el filtre complementari, que al contrari que el filtre de Kalman, no requereix un cost elevat de processament. En breus paraules, un filtre complementari és la unió de dos filtres: un *High-pass filter* pel giroscopi, i

un *Low-pass filter* per a l'accelerometre. Tant el Kalman com el Complementari són opcions vàlides per al projecte, però després de la recerca, s'ha pogut observar que el filtre complementari és més utilitzat que el filtre de Kalman en aquesta aplicació a causa del seu funcionament més senzill i alhora eficaç.

Pel que fa a materials per a l'estructura del dispositiu, existeixen projectes amb diferents materials utilitzats com ara planxa d'alumini, fusta o fins i tot metacrilat. Però en el present, amb l'evolució dels materials disponibles per a la fabricació additiva, s'obre un ventall de possibilitats que cal estudiar. Els dos materials més utilitzats els últims anys per a la impressió 3D són els següents:

- PLA (Poly-Lactic Acid)
- ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)

Després d'una breu recerca en materials d'impressió 3D, s'han descobert tres filaments relativament nous:

- PET-G (Polyethylene terephthalate glycol-modified): Un polietilè modificat amb glycol que dona unes propietats al material que augmenten la rigidesa, resistència mecànica i resistència a la temperatura.
- Carbon PLA/PET-G: Filament del tipus PLA o PET-G amb diminutes fibres de carboni que fan augmentar la qualitat de les propietats mecàniques del material.

D'entre aquests tres nous materials, es tendeix a treballar més amb el PET-G normal degut a que és un material més net i més fàcil de treballar. Imprimir amb un material que conté carboni requereix fer algunes modificacions a l'impressora, com per exemple substituir la boquilla extrusora de bronze per una d'acer per l'abradió que provoquen de les fibres. Els diferents projectes d'estabilitzadors vistos que estan fets amb fabricació additiva, estan fets de PLA, ja que és el material més fàcil d'imprimir i ofereix unes propietats que solen ser suficientment bones per a la majoria d'aplicacions.

Quant a sensòrica, existeixen projectes amb diferents eleccions per a sensors, des dels que afecta a llegir els moviments dels motors fins als quals mesuren el moviment de l'estabilitzador. Els primers, anomenats *encoders*, mesuren els graus que es mouen els motors; els segons, anomenats Inertial measurement unit, Unitat de mesura inercial (IMU), mesuren les acceleracions i velocitats angulars del cos al qual està situat el sensor. L'opció més senzilla seria utilitzar un sol sensor IMU per determinar els moviments per compensar el moviment realitzat per l'usuari, aquest mètode és el que requereix menys potència de càlcul per part del controlador, tot i que és el que menys informació dona al sistema de control. La segona opció seria utilitzar dos IMU, una situada al mateix lloc que el cas anterior (on se situa la càmera) i la segona situada al cos base del dispositiu (el cos per on se subjecta el dispositiu) per tal d'obtenir informació d'on se situa la càmera respecte al cos base. L'última opció i probablement la més complicada seria utilitzar *encoders* per als motors, així es tindria un segon banc d'informació, però també s'ha de tenir en compte que és l'opció que requereix més potència de càlcul i podria fer que el sistema funcionés forçat i alhora suposaria un consum energètic més elevat.

# Capítol 2

## Modelització matemàtica

Un model matemàtic de l'estabilitzador és important per tal d'encaminar l'estratègia del control. L'objectiu d'aquest capítol és trobar, mitjançant el model de Lagrange, les equacions necessàries que representin el model real. Per poder modelar correctament el sistema caldrà tenir molt clar quins seran els agents externs que intervenen i quina és la reacció del sistema davant d'aquests estímuls.

La modelització matemàtica es dividirà en *Cinemàtica* i *Dinàmica*. En cada secció s'explicarà en més detall aquests dos camps referits a l'estabilitzador.

### 2.1 Propietats de l'estabilitzador

Per entendre millor quin serà el comportament i moviment del dispositiu, aquesta secció presenta, sense entrar en molt detall, les propietats de l'estabilitzador.

#### 2.1.1 Mecànica

L'estabilitzador està construït principalment de plàstic del tipus PETG (material d'impressió 3D) i consisteix en un total de 4 cossos (C1, C2, C3, CB) connectats per tres punts de rotació ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ). Cada punt de rotació es condueix amb un motor del tipus *Brushless* connectat directament a cada braç de suport que forma l'estabilitzador.

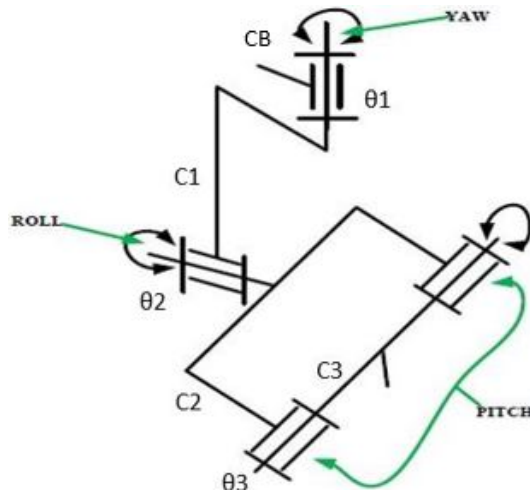


Figura 2.1: Cinemàtica d'un estabilitzador amb tres articulacions de revolució



Els braços que formen l'estabilitzador tenen tres mides diferents de manera que facilita el plegament de les diferents parts, fent que sigui còmode de transportar. Aquests braços pengen l'un de l'altre com es veu a la Figura 2.1, i tots aquests components es mouen respecte l'anterior. El Braç de *Yaw* està connectat a un motor que al mateix temps està connectat a la base que conté un compartiment amb les peces electròniques necessàries. A continuació, es fa un llistat de les peces impreses en 3D i el seu pes (Excloent cargols):

- Braç Yaw: 43g
- Braç Pitch: 40g
- Braç Roll: 44g
- Tapa MPU6050: 3g
- Compartiment electrònic: 108g
- Tapa del compartiment electrònic: 24g
- Mànec: 53g

Els motors seleccionats per al prototip són per aplicacions de baix parell requerit, per tant qualsevol mesura que es pugui prendre per reduir el pes total de les parts mòbils serà útil. Per tant, per optimitzar el pes del dispositiu s'utilitzaran cargols i femelles de titani a les peces que siguin mòbils i suposin un esforç per al motor. En total hi ha:

- $4 \times 3 \times 2 + 3$  (27) cargols M3
- 1 cargol M6
- 1 femella M6

A part dels cargols disposats a les peces mòbils, hi ha més cargols a les parts del compartiment electrònic. En total es faran servir:

- 27 cargols de les peces mòbils,
- 8 cargols i 4 femelles per la tapa del compartiment electrònic i mànec.
- 2 cargols per subjectar la placa electrònica a dins el compartiment electrònic.

En total, l'estabilitzador comptarà amb 37 cargols i 4 femelles M3 i, 2 cargols i 2 femelles M6.

## 2.1.2 Electrònica

A part de totes les peces mecàniques, l'estabilitzador realitzarà els moviments gràcies als components electrònics com els tres motors, la bateria, la placa controladora, etc. Tots aquests components afectaran al pes total de l'estabilitzador. A continuació es mostra una aproximació del pes de les peces:

- Motors: 3x41g (123g)
- Placa controladora: 12g
- Sensor MPU6050: 2.1g
- Bateria: 100g

## 2.2 Esquema del sistema

En un projecte com aquest, cal tenir molt clar el procediment que seguirà l'algorisme de control per tal de compensar els estímuls externs mitjançant els actuadors interns. A continuació es pot veure un diagrama de flux molt bàsic que permet veure gràficament quin serà aproximadament l'ordre de funcionament del sistema:

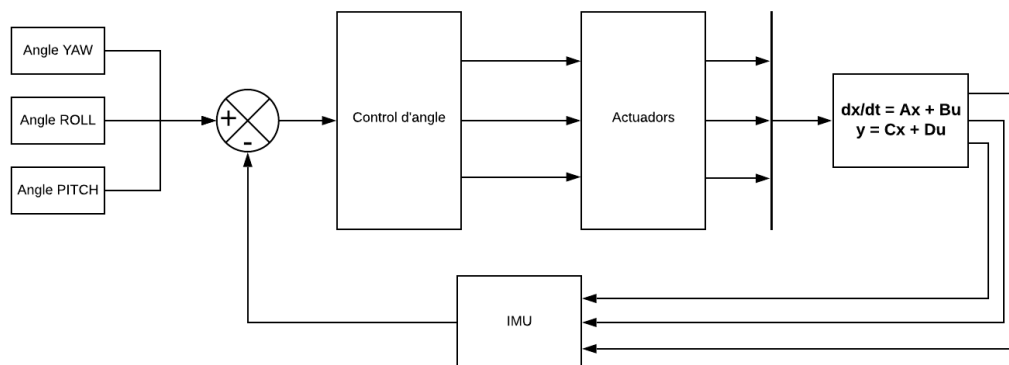


Figura 2.2: Diagrama de flux general del sistema

Principalment, l'objectiu del sistema és mantenir els valors de: *AngleYAW*, *AngleROLL*, *AnglePITCH* per aconseguir que la càmera es mantingui mirant a l'horitzó, i els angles es fixaran a 0 per aconseguir-ho. Un cop determinada la referència, els valors es compararan amb els valors rebuts pel sensor de mesura inercial (IMU) en el sistema de control d'angle. Posteriorment, determinat l'error, es farà enviar un senyal als motors que provocarà una sortida de parell d'aquests fent que l'estabilitzador s'auto-posicioni a la posició de referència definida pels tres angles entrats a l'inici del diagrama de flux. Durant aquest procés caldrà tenir en compte la dinàmica de les parts com ara les inèrcies i parells. Tot això està reflectit en les equacions d'estat  $dx/dt$  i  $y$ .

## 2.3 Cinemàtica de l'estabilitzador

Per modelar un sistema mecànic és essencial descriure quina és la seva geometria. La cinemàtica és una eina per realitzar aquesta tasca. La geometria es pot dividir en rotacions i translacions que descriuen els cossos del sistema. Per representar les rotacions s'utilitzen matrius de rotació. Aquestes matrius relacionen la coordenada entre dos SCC que tenen una rotació relativa. Per tal d'assignar correctament els sistemes de coordenades del dispositiu, s'aplicarà el criteri de Denavit-Hartenberg. Aquest criteri serveix per descriure una estructura cinemàtica d'una cadena articulada constituïda per articulacions amb un sol DoF. L'estabilitzador consta de 4 cossos, per tant, s'han de definir 4 sistemes de coordenades per definir correctament la geometria del sistema. La Figura 2.3 és una representació esquemàtica dels sistemes de coordenades presentats a l'estabilitzador. Després d'aplicar el criteri de Denavit-Hartenberg, els angles de rotació (representats per  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  a la figura 2.1) passen a coincidir amb els eixos  $Z_0$ ,  $Z_1$  i  $Z_2$ .

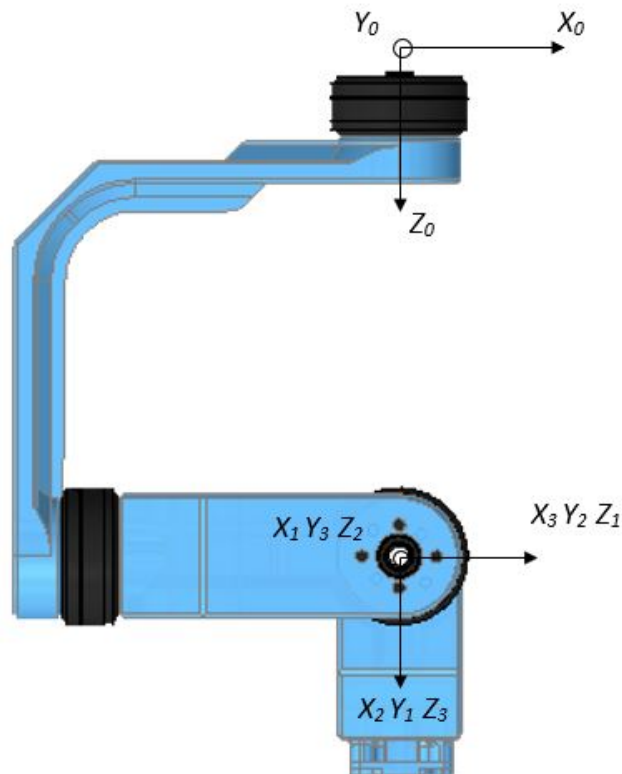


Figura 2.3: Criteri de Denavit-Hartenberg

### 2.3.1 Matrius de rotació i transformació

A continuació, es mostren les matrius de rotació i transformació entre els sistemes de coordenades definits a la Figura 2.3. Es comença des del cos 0 fins arribar a l'últim (3).

La rotació sobre l'eix  $Z$  ( $YAW$ ) per l'angle  $\theta_1$  que relaciona el cos 0 relativament amb el cos 1 és

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 \\ \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

i el vector de translació és

$$d_1^0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Sent  $h$  la distància del SCC 0 als demés en l'eix  $Z_0$ . Finalment, la matriu de transformació és

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} R_1^0 & d_1^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

De la mateixa manera es pot trobar la matriu de rotació del cos 1 relativament amb el cos 2 sent

$$R_2^1 = \begin{bmatrix} -\sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \\ \cos\theta_2 & 0 & \sin\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

En aquest cas, els orígens dels SCC dels dos cossos coincideixen, per tant, el vector de translació és

$$d_2^1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

I la matriu de transformació resulta ser

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} R_2^1 & d_2^1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Finalment, la matriu de rotació pel cos 2 relatiu al cos 3 és

$$R_3^2 = \begin{bmatrix} -\sin\theta_3 & 0 & \cos\theta_3 \\ \cos\theta_3 & 0 & \sin\theta_3 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

De nou, els orígens dels SCC dels dos cossos coincideixen, per tant, el vector de translació és

$$d_3^2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

I la matriu de transformació resulta ser

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} R_3^2 & d_3^2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Una vegada obtingudes les matrius de rotació i transformació relatives entre els tres cossos, es poden obtenir les matrius de rotació i transformació entre la base (Cos 0), que és el cos el qual l'usuari subjectarà, i l'últim cos (Cos 3), que és el cos en el qual es té interès que es mantingui alineat a l'horitzó. Per tant, resulta interessant saber la relació entre aquests dos cossos. La matriu de rotació es pot aconseguir mitjançant el producte de les tres matrius de rotació obtingudes anteriorment, de manera que

$$R_3^0 = R_1^0 \cdot R_2^1 \cdot R_3^2 \quad (2.10)$$

i la matriu de transformació entre la base i el cos 3 és

$$T_3^0 = T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_3^2 \quad (2.11)$$

## 2.4 Dinàmica de l'estabilitzador

Per determinar les equacions de moviment del sistema és necessari saber com es representen les velocitats de les articulacions de l'estabilitzador. Aquesta mena de mapat s'anomena Jacobià i és un mapat lineal entre les velocitats de les articulacions i dels cossos obtingut a partir de les matrius de rotació obtingudes anteriorment a l'apartat 2.3.1.

### 2.4.1 Obtenció del Jacobià

La Jacobiana es representa respecte la base (Cos 0), el Jacobià per cada articulació és:

$$J_1^0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$J_2^0 = \begin{bmatrix} 0 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & \sin\theta_1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$J_3^0 = \begin{bmatrix} 0 & \cos\theta_1 & -\cos\theta_2 \sin\theta_1 \\ 0 & \sin\theta_1 & \cos\theta_1 \cos\theta_2 \\ 1 & 0 & \sin\theta_2 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

### 2.4.2 Energies de l'estabilitzador

L'objectiu de les equacions de moviment és trobar un model que descriu com depenen els actuadors (motors) respecte els estats de les articulacions. El mètode que s'utilitza per obtenir aquestes equacions és Lagrange. Aquest mètode dona un parell a l'actuador en funció de les variables d'estat de posició i els seus diferencials (velocitats). L'equació de Lagrange es defineix com:

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - V(q) \quad (2.15)$$

Sent  $K$  l'energia cinètica del sistema i  $V$  l'energia potencial del sistema.

#### 2.4.2.1 Energia Cinètica

L'energia cinètica total del sistema és

$$K = \sum_{k=1}^n K_i \quad (2.16)$$

on  $K_i$  és l'energia cinètica de cada un dels cossos que formen l'estabilitzador. Segons Cardoso et al. [2017], l'energia cinètica total del sistema és

$$K = \frac{1}{2}(\dot{q})^T D(q)\dot{q} \quad (2.17)$$

on

$$D(q) = \sum_{i=1}^n J_i(q)^T R_i^0 I_i (R_i^0)^T J_i(q) \quad (2.18)$$

sent  $I_i$  la matriu d'inèrcia del cos  $i$ , i  $R_i^0$  la matriu de rotació del cos  $i$  respecte la base.

### 2.4.2.2 Energia Potencial

De la mateixa manera, es calcula l'energia potencial total del sistema de manera que

$$U = \sum_{k=1}^n U_i \quad (2.19)$$

on  $U_i$  és l'energia potencial de cada cos  $i$  i pren el valor

$$U_i = -m_i g^T r_{ci/0} \quad (2.20)$$

on  $r_{ci/0}$  és el vector entre el centre de gravetat del cos  $i$  i la base  $0$ ,  $m_i$  és la massa del cos  $i$ , i  $g^T$  és el vector de gravetat transposat.

### 2.4.3 Equació de Lagrange

El model de Lagrange no és el més intuïtiu, per això a continuació es descriuen totes les parts que formen el model. L'equació principal del model de Lagrange es defineix com

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} \right) - \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} \right) = Q \quad (2.21)$$

Després de desenvolupar l'equació 2.21, s'arriba a una expressió dividida en diferents matrius:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Q \quad (2.22)$$

$D(q)$  amb elements  $d_{ij}$  descriu les inèrcies de l'estabilitzador. A la matriu, quan  $i = j$ , es descriu la inèrcia d'aquell eix en concret ( $X, Y, Z$ ) i quan  $i \neq j$  descriu l'efecte inercial en l'eix  $j$  sobre l'eix  $i$ . La matriu  $C(q, \dot{q})$  amb elements  $C_{ij}$  descriu els efectes de centrifugació i els efectes de Coriolis on

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^n h_{ijk} \dot{q}_k \quad (2.23)$$

on els elements  $h_{ijk}$  representen els efectes de Coriolis de les articulacions  $j$  i  $k$  sobre l'articulació  $i$ . A l'Annex B s'exposa el codi de Matlab utilitzat per arribar a l'expressió de  $C(q, \dot{q})$  amb els components  $C_{ij}$ .

$Q$  es defineix com el vector dels parells que intervenen en el sistema.

La matriu  $G(q)$  es negligeix, ja que, com s'explica al Capítol 3, l'estabilitzador està balancejat mecànicament de manera que la gravetat gairebé no interfereix en la dinàmica de l'estabilitzador. Si l'estabilitzador no es balanceja com cal, els motors han de compensar els moments estàtics induïts per l'acceleració de la gravetat. Això fa que el rendiment del sistema compensador sigui inferior. Per això, és molt important realitzar un disseny on el centre de gravetat del conjunt estigui alineat amb els eixos de coordenades 1, 2, 3 (Figura 2.3) de manera que l'estabilitzador quan estigui parat, es mantindrà en una posició pròxima a la que s'hauria de mantenir en estat de funcionament. Per tant la matriu  $G(x_\theta)$  representada simbòlicament a l'equació 2.28 serà nul·la.

### 2.4.4 Model complet

Per modelar completament l'estabilitzador és necessari modelar la fricció. Per tal de fer això, cal mirar quines són les característiques del motor.

Després de buscar a la taula de l'Annex A i tenint en compte que és una taula amb valors semblants als que haurien de ser però que serveixen per modelar la fricció, s'obtenen els següents valors aproximats que poden anar bé per aquest model:

- $F_s = 0.714e^{-3}$  mNm
- $F_v = 2.563e^{-6}$  Nm/rad/s

Aquests paràmetres s'utilitzaran per realitzar els càlculs amb la resta de dades al Matlab.

El model complet passa a ser:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) = Q \quad (2.24)$$

Si es resol l'equació per a  $\ddot{q}$ :

$$\ddot{q} = D(q)^{-1}(Q - C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) - F(\dot{q})) \quad (2.25)$$

Finalment es poden escriure les equacions de moviment en espai d'estats de la manera que:

$$X_\theta = q \quad (2.26)$$

$$X_\omega = \dot{q} \quad (2.27)$$

i finalment,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_\theta \\ \dot{x}_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_\omega \\ D(q)^{-1}(Q - C(x_\theta, x_\omega)x_\omega - G(x_\theta) - F(x_\omega)) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

On  $F(x_\omega)$  es calcula amb Matlab, tal i com es veu a l'apèndix C, a partir dels valors  $F_s$  i  $F_v$  obtinguts anteriorment.

Així doncs, l'equació 2.28 és la funció d'estudi final que descriu totes les propietats del sistema.



# Capítol 3

## Disseny 3D

Un disseny 3D en l'àmbit Mecatrònic es basa a realitzar un model del prototip de manera que es coneixen quins components electrònics i mecànics que s'utilitzaran per a l'acoblament. En el cas d'aquest projecte s'han de dissenyar les peces mecàniques com els tres braços de Yaw, Pitch i Roll d'acord amb les dimensions i capacitats dels components electrònics com els motors, ja que poden exercir un parell determinat. Un altre factor important és enfocar el disseny de manera que els braços de l'estabilitzador es mantinguin en posició de treball en estat de repòs (sense alimentació), és a dir, aconseguir una disposició dels components que provoqui un baix efecte de l'acceleració de la gravetat. Si s'aconseguís un balanceig perfecte, la gravetat no afectaria l'estabilitzador.

Aquest capítol explica com s'han dissenyat les peces per tal de fer el dispositiu compacte tenint en compte les seves capacitats i quin ha sigut el procediment per aconseguir un balanceig força ajustat. Cal mencionar que un balanceig molt ajustat no és possible, ja que els models CAD es consideren sòlids, i tot i tenir la mateixa massa que els cossos reals, el seu centre de gravetat pot variar a causa de l'organització dels seus components interiors (com és el cas d'una càmera o un telèfon). En el cas de les peces impreses en 3D també afecta perquè la massa de l'interior es disposa en forma de malla, per tant en parts on hi ha una zona amb molta part de malla, en el programa es disposa com a sòlid i fa que canviï el centre de gravetat.

### 3.1 Peces Predissenyades

Hi ha peces la importància de les quals no és el disseny propi sinó l'exactitud de les seves propietats, per tant algunes de les peces estan extretes de Gra [2020]. Les peces que s'han utilitzat per al muntatge que estaven disponibles ja dissenyades, són les peces que s'han comprat o el disseny ja està fixat:

- Motors Brushless
- Placa controladora (Storm32)
- IMU
- GoPro
- Telèfon mòbil

## 3.2 Disseny i característiques de les peces

La majoria de les peces que s'indiquen en les diferents subseccions es fabricaran posteriorment mitjançant impressió 3D o bé s'han dissenyat per tal de poder simular el seu pes i dimensions i poder dissenyar correctament la resta de peces.

### 3.2.1 Braç Yaw

Els tres braços s'han dissenyat un a partir de l'altre, és a dir, tenen una aparença visual molt semblant. Varien les seves dimensions de llargada dels dos extrems del colze. En aquest cas, el braç corresponent a l'eix anomenat Yaw ( $Z$ ), és el més gros de tots tres, ja que els demés braços no han d'interferir amb aquest i han de poder situar-se en una posició de manera que el dispositiu amb tots els braços plegats quedi en una posició compacte i transportable.

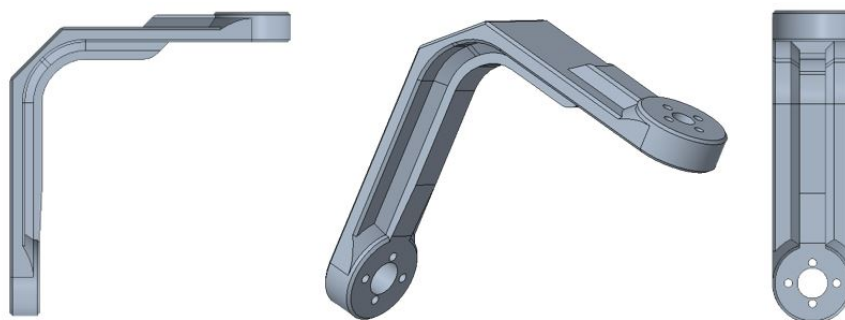


Figura 3.1: Vistes dièdriques del Braç de l'eix Yaw

Aquesta peça té un reforç en forma de nervi que li dona rigidesa i resistència de forma més que suficient per aguantar els 212 grams que ha de suportar. El disseny d'aquesta peça està enfocat en un pes reduït amb una resistència elevada, a més es vol aconseguir una gran rigidesa per tal de suprimir qualsevol flexió del material que suposés una lectura no desitjada al sensor inercial. El diàmetre de la circumferència coincident amb els 4 forats de diàmetre 3.2mm on es passaran els cargols per collar els motors s'ha extret de les distàncies a les quals estan situats els forats als motors. En una de les cares dels motors, els forats estan tots 4 a 16mm, però a la banda oposada se situen dos d'ells a 19mm i els altres dos a 16mm.

### 3.2.2 Braç Pitch

Per dissenyar el braç coincident amb l'eix Pitch, s'ha reduït la llargada de les puntes del colze per tal d'evitar la col·lisió amb el braç de l'eix Yaw. Cal tenir en compte que els eixos de coordenades s'han d'alinear, per tant cal tenir en compte l'alçada dels motors que van posats entre els braços, aquesta distància es veu retallada en la longitud d'un dels extrems del braç. Aquest fet es veu perfectament a la figura 2.3. Cal observar que un cop plegats els braços, els eixos seguiran quedant alineats.

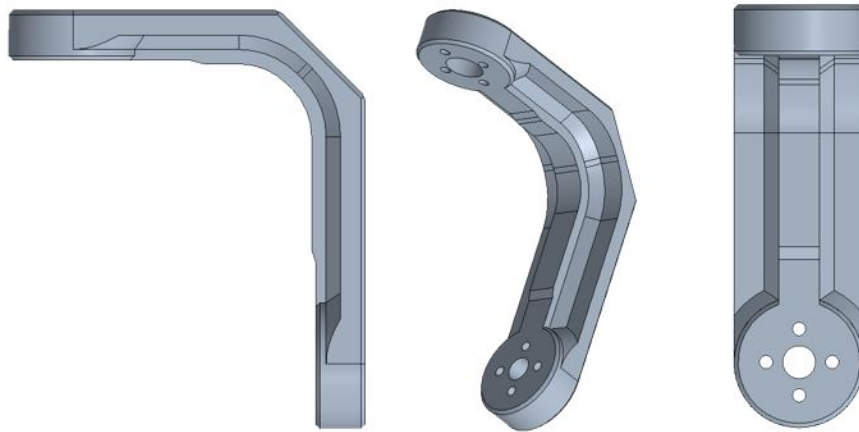


Figura 3.2: Vistes diédriques del Braç de l'eix Pitch

Aquest braç, tot i haver de suportar menys pes, serà més rígid que el braç de l'eix Yaw, ja que els extrems del braç son mes curts.

### 3.2.3 Braç Roll

Aquest braç amb el seu eix de rotació junt amb el motor respecte l'eix coincident amb l'angle Roll disposa d'una ranura amb la funció de poder ajustar la posició del dispositiu per tal de balancejar l'estabilitzador.

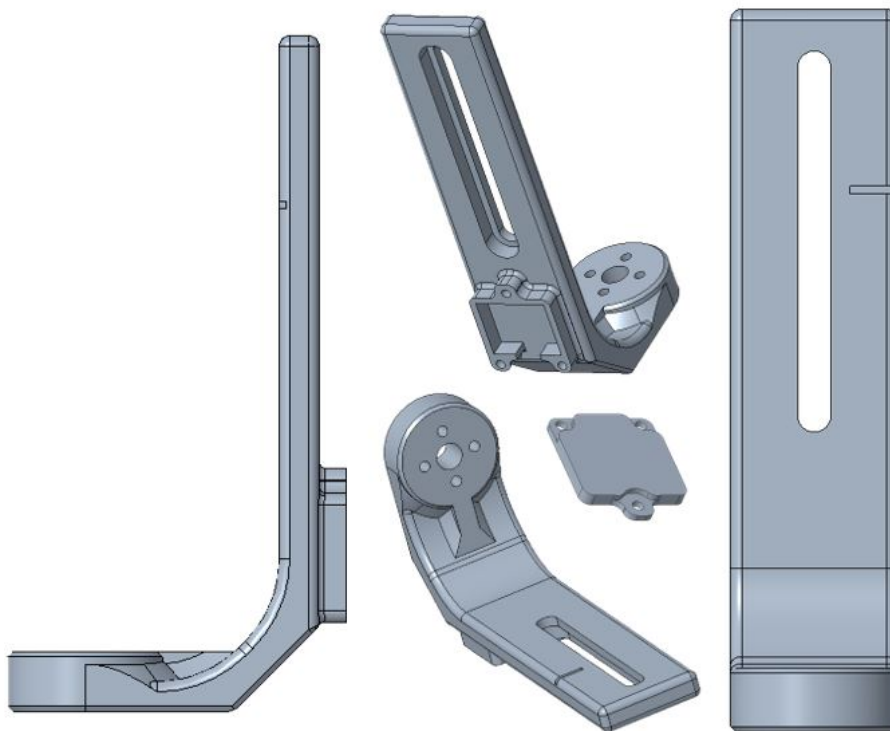


Figura 3.3: Vistes diédriques del Braç de l'eix Roll

Per defecte, s'ha inserit una petita marca per indicar on s'ha de situar el suport del dispositiu. La posició de la marca ve definida pel petit estudi que es fa a l'apartat

3.4 per determinar el balanceig dels braços juntament amb el dispositiu. Aquest braç incorpora un petit compartiment per el sensor inercial que va cobert per una petita tapa amb poca complexitat de disseny.

### 3.2.4 Bateria

És important per al disseny del compartiment on s'emmagatzemen els components electrònics, saber les dimensions de tots aquests, per tant, després de buscar la bateria més adient per a l'aplicació, es representa en el software CAD per determinar les mides i també el pes mitjançant les propietats de massa del cos. La bateria escollida té una capacitat de 1500 mAh i un voltatge de 11,1V. El pes d'aquesta bateria és de 100 grams.

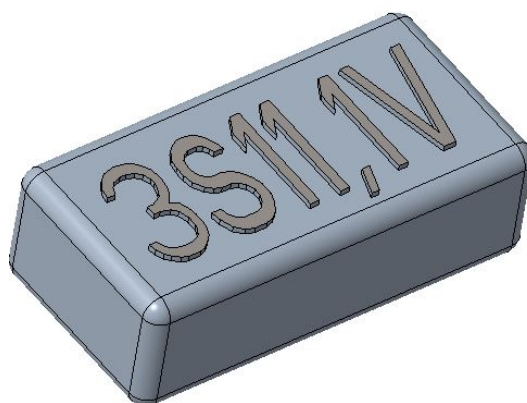


Figura 3.4: Disseny simplificat de la bateria

### 3.2.5 Placa Controladora

La placa seleccionada per aquest projecte és poc comuna ja que és un disseny realitzat per un enginyer alemany que es fa dir OlliW. El disseny de la placa ha estat realitzat per ell, i al ser gratuït i obert, diverses companyies han pogut fabricar aquestes plaques. La placa, anomenada Storm32, traslladada al CAD té la següent forma:

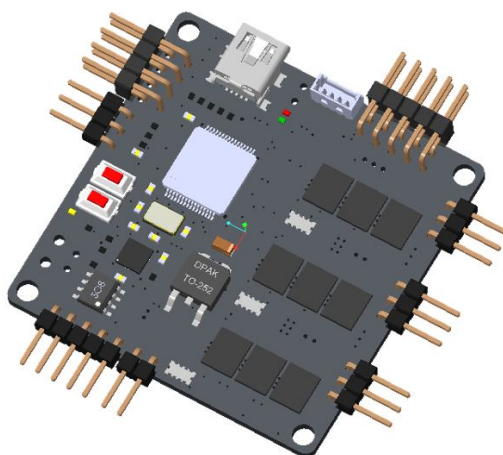


Figura 3.5: Model CAD de la placa, model extret de Gra [2020]

Les característiques importants d'aquesta placa son:

- Microprocessador STM32F103RCT6 a 72 Mhz
- Drivers dels motors incorporats DRV8313
- Port  $I^2C$  per connectar una IMU
- IMU MPU6050 a bord
- IMU MPU 6050 externa (Connectada per  $I^2C$ )
- Alimentació de 9-18V (3-4S)

### 3.2.6 MPU6050

Aquest model ha servit per esbrinar la localització d'ell mateix, ja que el xip ha de quedar alineat amb el mínim d'un eix, per tant és important dissenyar també el braç de l'eix Roll per fer que la MPU6050 quedi ben centrada. El model és el següent:

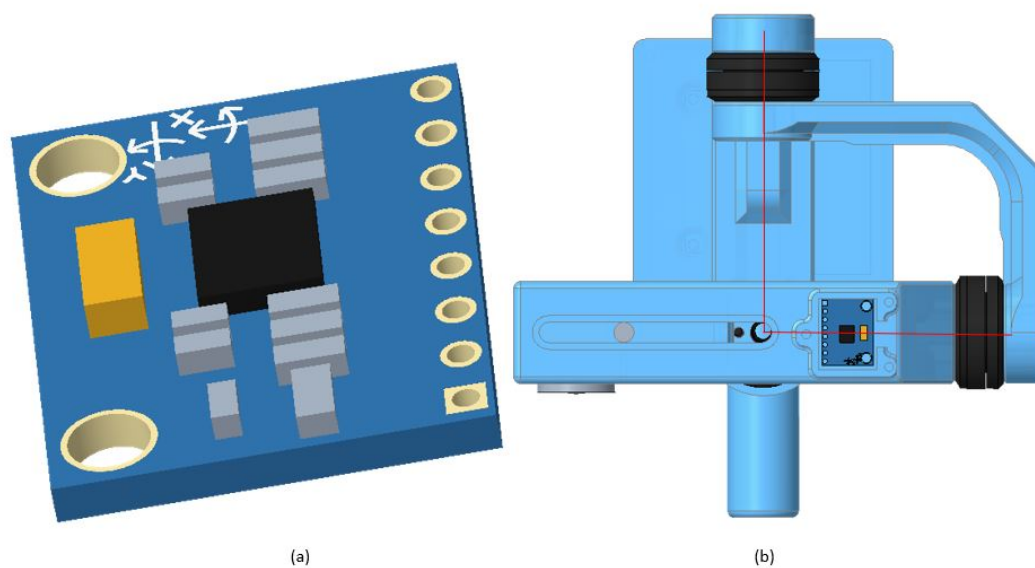


Figura 3.6: (a) Model en CAD de la IMU MPU6050, model extret de Gra [2020]  
(b) Visualització de la col·locació de la MPU6050

Tal i com es veu a la Figura 3.6, a la dreta es veu la vista inferior de l'estabilitzador on, es pot observar l'aliniació dels tres eixos en un mateix punt i l'aliniació de la IMU amb l'eix Roll i creuant els altres dos. Característiques importants de la MPU6050:

- Acceleròmetre de 3 eixos i Giroscòpi de 3 eixos en el mateix xip
- Alimentació de 3-5 V
- Comunicació per  $I^2C$

### 3.2.7 Compartiment electrònic

Una vegada determinades les dimensions de tots els components electrònics, es dissenya un compartiment on es guardaran aquests components de manera que quedi compacte i els components ben agafats. El disseny final té la següent forma:

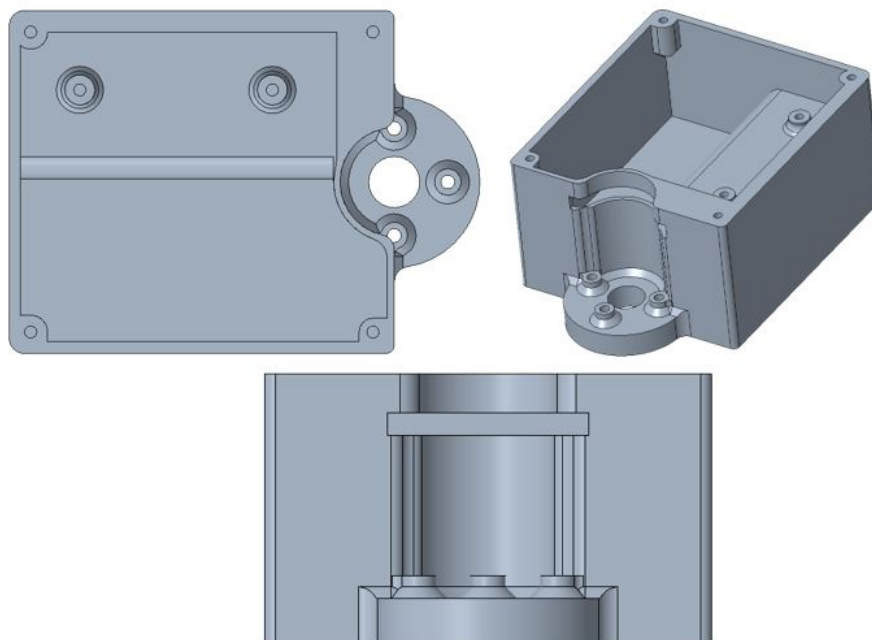


Figura 3.7: Model CAD del compartiment de components electrònics

### 3.2.8 Tapa del compartiment electrònic

Una vegada determinades les dimensions del compartiment pels components electrònics, cal cobrir i protegir els components en la mesura del possible, per tant es col·loca una tapa superior collada amb 4 cargols M3.

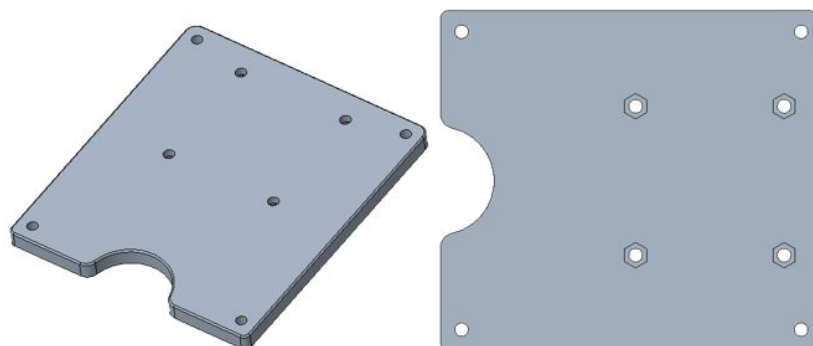


Figura 3.8: Model CAD de la tapa del compartiment electrònic

Tal i com es veu a la figura 3.8, hi ha 4 forats addicionals amb uns encaixos hexagonals per poder collar un mànec mitjançant cargols i femelles M3.

### 3.2.9 Mànec

Per tal d'operar el dispositiu, cal disposar d'un suport que serveixi per subjectar-lo amb comoditat. Per això, s'ha dissenyat un mànec en dos peces situat estratègicament de manera que el pes del conjunt recaigui en major part al centre del mànec. La unió de les dues peces es realitza mitjançant un cargol i femella de M6.

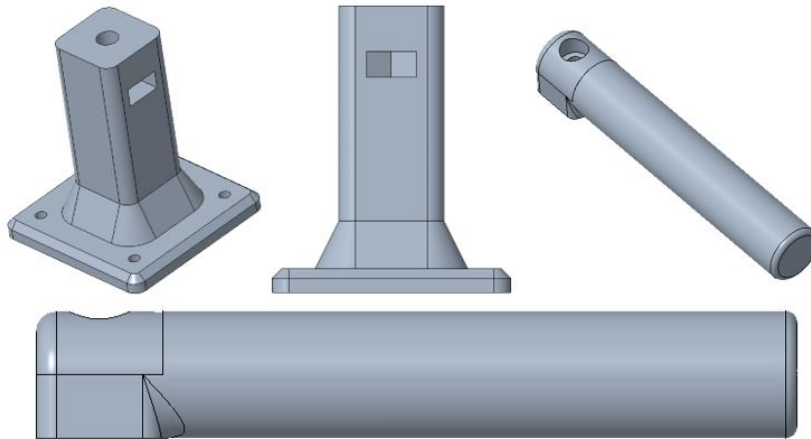


Figura 3.9: Model CAD del mànec de l'estabilitzador

La raó principal de dissenyar el mànec en dues peces és per aconseguir un model molt més assequible per imprimir en 3D, ja que si es dissenyés en una sola peça hi hauria un voladís en el cilindre del mànec i suposaria una dosificació de material molt més elevada per realitzar suports. A la Figura 3.10 es veu el suport que es pot evitar si el mànec es fa en dos peces separades.



Figura 3.10: Visualització en el programa d'FDM del suport que es vol evitar

Fabricar aquesta peça podria suposar un gast elevat de material, possibles imperfeccions i/o qualitats, és a dir, que l'estructura no estigui tant ben definida com amb l'opció de imprimir-la per separat sense suports.

### 3.2.10 Suports pels dispositius

El suport per la càmera esportiva és una modificació d'un model extret de Gra [2020] que s'ha adaptat per poder col·locar una femella de M6 situada al forat hexagonal de la peça. En canvi, el suport pel telèfon mòbil s'ha realitzat des de zero perquè era de menor complexitat.

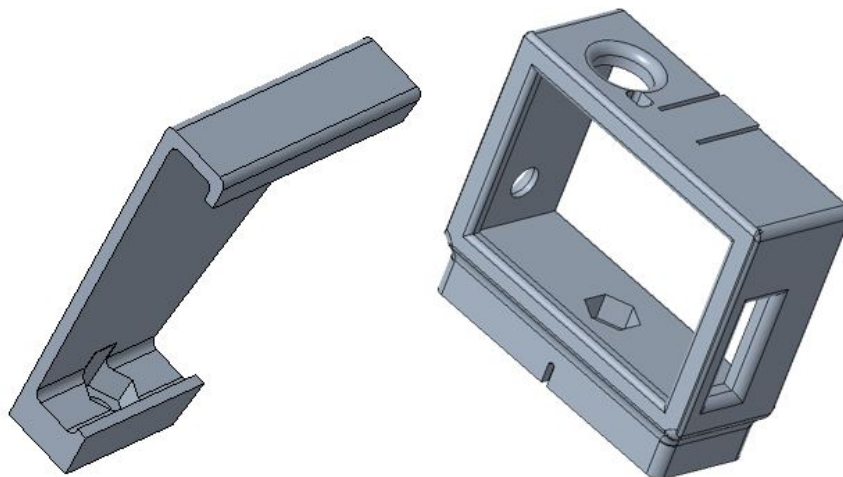


Figura 3.11: Models dels suports per als dispositius

### 3.2.11 Dispositius

Tots dos dispositius són models extrets de Gra [2020], propietats dels quals han estat modificats amb l'objectiu d'ajustar el seu pes a la realitat, de manera que la càmera pesa 87g i el telèfon pesa 154g.

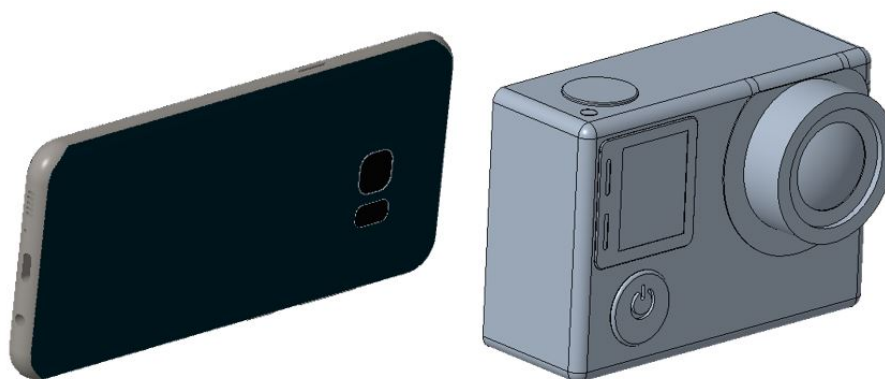


Figura 3.12: Models dels dispositius

Aquest ajustament del pes serà útil a l'hora de fer els càlculs d'inèrcies, tot i que cal dir que, com es veurà més endavant, els centres de gravetat no seran exactament els mateixos que als de la realitat degut a la disposició dels components interns (Bateries, microxips, etc.).



### 3.3 Acoblament de les peces

L'últim pas previ a poder realitzar simulacions dinàmiques és acoblar totes les peces juntes. Per realitzar aquesta tasca, s'utilitza el mateix programa que s'ha utilitzat per realitzar les peces individuals, però en mode "Assembly". Un cop realitzat l'acoblament de tots els cossos, es pot veure si hi ha algun error de disseny a les peces, com per exemple la desalineació dels eixos o aspectes semblants. Es pot observar que els eixos s'alineïn correctament i que hi ha espai suficient entre ells per evitar interferències i col·lisions. El resultat de l'acoblament és satisfactori, ja que un dels objectius d'aquest projecte és que el dispositiu sigui plegable. Degut a la suposició de les peces, es pot observar que en la posició de plegament el dispositiu queda força compacte considerant el volum que ocupa en posició de funcionament i que el mànec és desmuntable fàcilment.

La posició per defecte serà aquella que permet reduir el mínim l'espai que ocupa el dispositiu (posició de l'esquerra a la Figura 3.13), però la posició en la que es fan els estudis de balanceig és la mateixa en la que es troba el dispositiu en funcionament (posició de la dreta a la Figura 3.13).

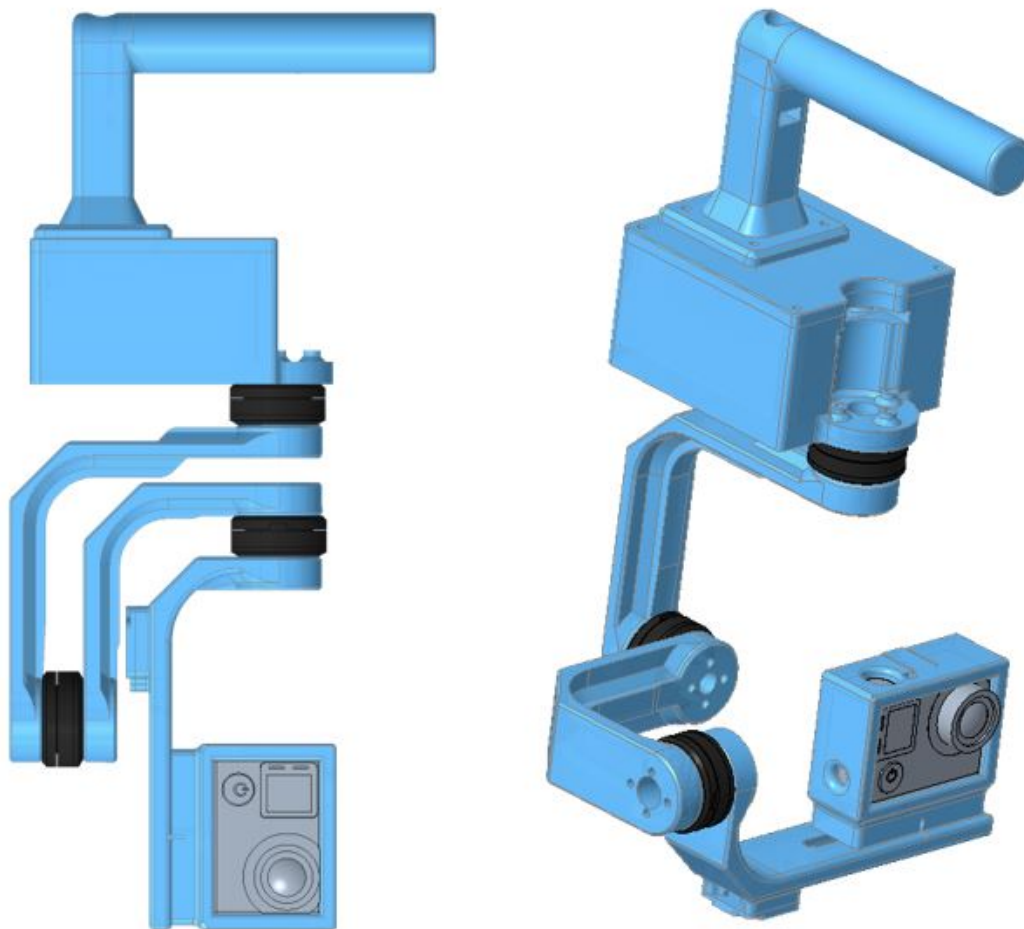


Figura 3.13: Vistes de les posicions principals de l'estabilitzador

### 3.4 Balanceig aproximat de l'estabilitzador

Per realitzar aquesta tasca es torna a utilitzar el PTC Creo, concretament, s'utilitza la part de simulació de mecanismes on es realitza una anàlisi dinàmica amb la gravetat. Per fer l'assaig, es mou el suport de la càmera fins arribar al punt d'equilibri mirant on cau el centre de gravetat del cos, aconseguint que el centre de gravetat del conjunt que inclou tots els cossos units des de la punta del braç de l'eix Roll fins al braç de l'eix Pitch, coincideixi amb l'eix central del braç de l'eix Yaw (Vertical).

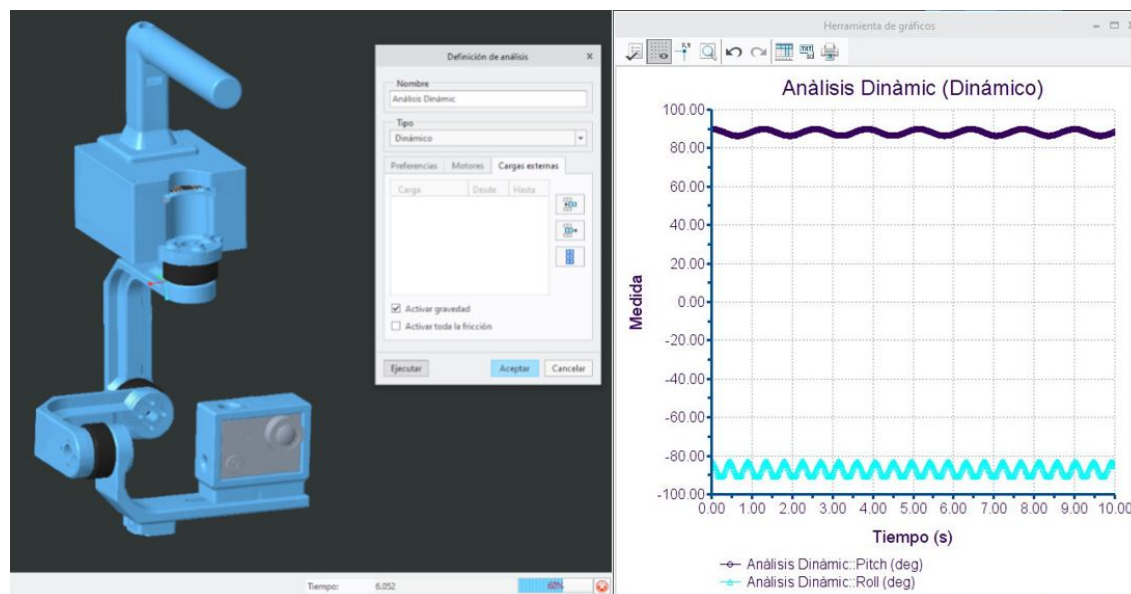


Figura 3.14: Execució i resultats d'una simulació dinàmica amb PTC Creo

Tal i com es veu a la Figura 3.14, amb l'efecte de la gravetat es genera una petita oscil·lació d'uns 4 graus en el braç de l'eix Pitch. En el cas del braç coincident amb l'eix Roll la variació és d'uns 8 graus. Això indica que el balanceig és millorable, tot i així, tal i com s'ha dit anteriorment, els centres de gravetat de les peces no estaran situats exactament al mateix lloc que als models reals, per tant, no és lògic mirar d'ajustar a la perfecció aquest aspecte amb el PTC Creo, sinó que es realitza un cop muntat el prototip experimentalment. Una curiositat que es pot observar del resultat dels anàlisis és la diferència de la freqüència d'oscil·lació dels dos cossos. Això és degut als pesos que suporten cada un d'ells. El braç de l'eix Pitch suporta el seu propi pes, el del motor i el pes del conjunt de l'eix Roll, en canvi el braç Roll només suporta el seu propi pes, el del seu motor i el de la càmera. Al tenir menys inèrcia, el braç oscil·la més ràpid. El fet que l'eix Roll estigui menys balancejat, no resultarà ser cap problema, ja que la posició natural de funcionament de l'estabilitzador és en horitzontal, per tant, si hi ha un desequilibri que suposi la tendència de caure avall, no suposarà un problema perquè l'estabilitzador mai intentarà marxar d'aquella posició.

### 3.5 Propietats físiques dels cossos

Després d'ajustar totes les masses dels cossos per fer que s'ajustin a la realitat, es pot procedir a obtenir totes les dades necessàries per realitzar el model en Matlab, aquestes dades son:

- Massa
- Inèrcies en el centre de masses del cos
- Centre de masses respecte la base

Per trobar aquestes propietats s'utilitza l'eina de simulació de PTC Creo que s'ha utilitzat en l'apartat anterior. Aquesta vegada però, no es realitza cap anàlisi dinàmic sinó que es consulten les propietats de massa de cada cos (Braç + motor i/o peça adjunta al braç).

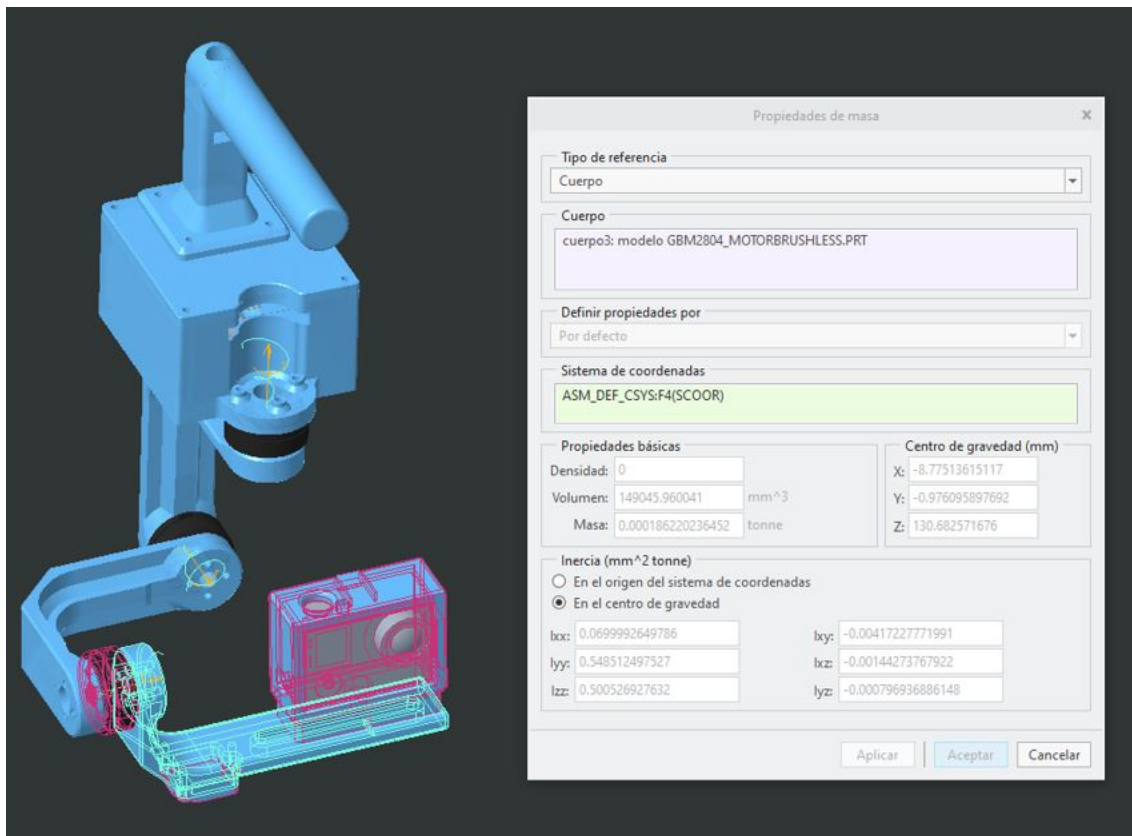


Figura 3.15: Exemple d'obtenció de les propietats del conjunt que forma el Braç Roll

Tal i com es veu a la Figura 3.15, els cossos que formen un conjunt es seleccionen automàticament al seleccionar el braç Roll. A la finestra "propiedades de massa" surten les dades de: la massa, les inèrcies en els diferents eixos i coordenades del centre de gravetat respecte el sistema de coordenades Base.

# Capítol 4

## Simulació amb Matlab i Simulink

Un cop determinat el model matemàtic i les característiques físiques de les peces, és hora de desenvolupar un model amb Matlab i Simulink que permeti simular com es comportarà l'estabilitzador i determinar paràmetres de treball. És necessari que aquest model descriu de manera molt similar el model real, per tant, és també molt important que el disseny CAD sigui precís i cal definir cada una de les peces amb el material corresponent de manera que els pesos de les peces es corresponguin amb la realitat per tal d'obtenir valors d'inèrcies i centres de gravetat adequats.

El que es vol aconseguir en aquest apartat és generar un model virtual a partir del model matemàtic realitzat al capítol 2. Això s'aconseguirà anant més enllà del model matemàtic aprofitant les dades obtingudes en el Capítol 3 i la potència del Matlab per generar tots els càlculs matemàtics de les matrius i equacions descrites al model matemàtic.

### 4.1 Obtenció de les equacions d'estat amb Matlab

Un cop obtingudes les expressions de les equacions d'estat de l'estabilitzador a l'apartat 2, es pot procedir a obtenir les matrius calculades amb Matlab. Primer cal entrar les dades obtingudes al capítol 3. A continuació es mostren les propietats que s'han obtingut a partir dels models realitzats amb PTC Creo dels conjunts Yaw, Pitch i Roll:

Inèrcies:

$$Yaw : 1.0e - 03 \cdot \begin{bmatrix} 0.0999 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2244 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1350 \end{bmatrix} Kgm^2 \quad (4.1)$$

$$Pitch : 1.0e - 03 \cdot \begin{bmatrix} 0.0845 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0433 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1183 \end{bmatrix} Kgm^2 \quad (4.2)$$

$$Roll(GoPro) : 1.0e - 03 \cdot \begin{bmatrix} 0.5484 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0705 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5001 \end{bmatrix} Kgm^2 \quad (4.3)$$

$$Roll(Mòbil) : 1.0e - 03 \cdot \begin{bmatrix} 0.7746 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1155 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6725 \end{bmatrix} Kgm^2 \quad (4.4)$$

Centres de Gravetat respecte la base:

$$Yaw : \begin{bmatrix} -0.0291 \\ 0.000 \\ 0.0288 \end{bmatrix} m, Pitch : \begin{bmatrix} -0.0657 \\ 0.0208 \\ 0.1220 \end{bmatrix} m \quad (4.5)$$

$$Roll(GoPro) : \begin{bmatrix} 0.0002 \\ -0.0085 \\ 0.1310 \end{bmatrix} m, Roll(Mòbil) : \begin{bmatrix} 0.0016 \\ -0.0064 \\ -0.1237 \end{bmatrix} m \quad (4.6)$$

Aquests valors d'inèrcies i centres de massa són entrats al model de Matlab i es realitzen els càlculs pertinents per tal d'obtenir les 4 matrius lineals que completen el model d'equacions d'estat (A, B, C, D) indicat a la Figura 2.2.

#### 4.1.1 Obtenció del sistema linealitzat.

Tal i com ja s'ha mencionat, per calcular les matrius del model LQR (sistema compensador), cal utilitzar el Matlab a causa de la complexitat del càlcul a realitzar. Per linealitzar el sistema s'avalua la Jacobiana de l'equació del sistema no lineal (2.28) amb els valors de les variables on es desitja que el dispositiu sigui estable, és a dir, en posició de funcionament (posició de la dreta a la Figura 3.13). Gràcies a la Jacobiana es pot linealitzar el model i es pot resoldre. A l'apèndix D es mostren els càlculs realitzats amb Matlab que s'han fet per arribar al resultat de les matrius A, B, C, D. Una vegada calculades, s'introdueixen al model de blocs realitzat amb Simulink.

## 4.2 Model de blocs amb Simulink

Per aquest projecte s'han obtingut dos models per simular amb Simulink. El primer de tots és el model que s'ha trobat a partir del model matemàtic, i el segon és un model realitzat amb una eina de Matlab anomenada Simscape Multibody. Aquesta extensió de Matlab proporciona un entorn de simulació multi-cos per a sistemes mecànics 3D, com robots, suspensions de vehicles i més sistemes. Pot modelar sistemes utilitzant blocs que representen cossos, articulacions, restriccions, elements de força i sensors. Aquest sistema formula i resol les equacions de moviment de tot el sistema mecànic. Per a aquest projecte s'ha importat el model CAD desde PTC Creo. Un cop importat el model, el multibody permet veure una animació 3D generada automàticament per visualitzar la dinàmica del sistema.

#### 4.2.1 Model Simulink convencional

Per entendre millor com funciona el diagrama de blocs fet amb Simulink, a continuació es mostra el diagrama sencer per poder observar quin és el funcionament del cicle del sistema, i finalment es mostraran els dos blocs principals separats per poder entendre'ls millor.

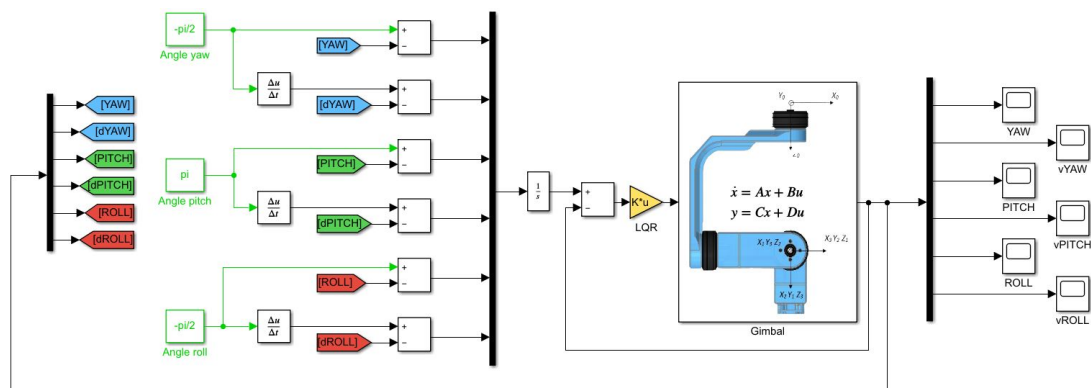


Figura 4.1: Model complet de Simulink

Una manera simplificada d'explicar el funcionament d'aquest sistema és explicar-ho com si fos un sistema que compara i compensa. Els valors *Angle Yaw*, *Angle Pitch*, *Angle Roll* són els valors dels angles en els quals l'estabilitzador s'ha de mantenir, és a dir, si el sistema rep una pertorbació que provoca una desviació d'aquests angles, aquest ha de reaccionar i provocar un moviment dels motors que compensin aquesta desviació i fer-la zero.

#### 4.2.1.1 Primera realimentació

En referència a la Figura 4.2 i, de nou, els valors de referència són els tres mencionats anteriorment, el primer pas que realitza aquest sistema és comparar els valors de referència amb els de l'últim cicle (Etiquetes YAW, PITCH, ROLL) mitjançant la resta d'aquests, de manera que cada vegada que es realitza aquesta operació s'obté l'error de posició de cada eix de l'estabilitzador. A part de les posicions, també es re-alimenten les velocitats referents a cada eix (Etiquetes dYAW, dPITCH, dROLL) i es comparen amb els últims valors del cicle per obtenir, igual que amb les posicions, l'error de les velocitats de cada eix de l'estabilitzador.

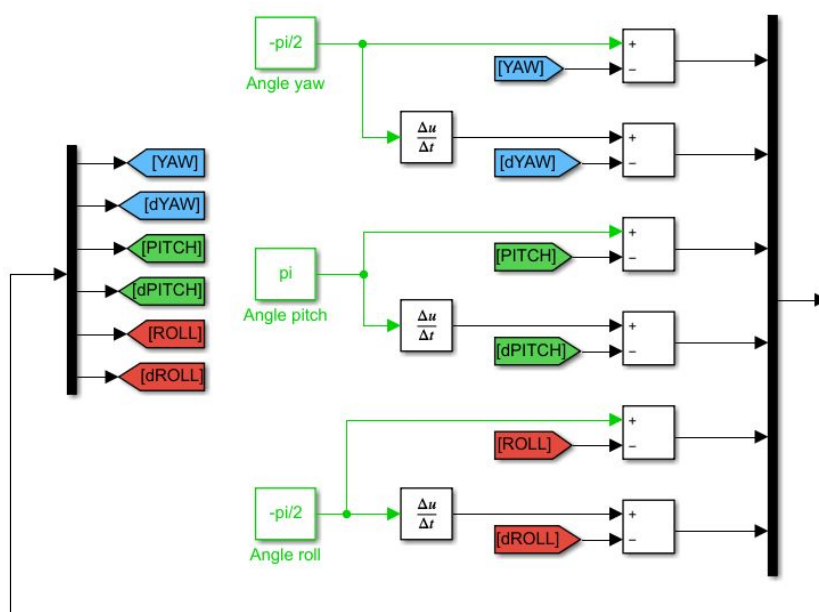


Figura 4.2: Primera realimentació

A l'entrada del multiplexor, al final, s'entren els sis valors referents als errors de les tres posicions i les tres velocitats mencionades anteriorment. Aquests valors passen a la següent fase del sistema on entra en joc tota la feina referent al model realitzat amb Matlab. Per tant, en resum, aquesta primera realimentació serveix per obtenir dades referents a la posició i velocitat dels cossos de l'estabilitzador en cada moment per saber en quina mesura s'haurà de moure l'estabilitzador.

#### 4.2.1.2 Segona realimentació

Una vegada obtingudes les dades de referència mitjançant la primera realimentació, es passa al traspàs d'aquestes dades a la realimentació on s'inclou el model de Matlab amb les equacions d'estat i la matriu de càlcul LQR.

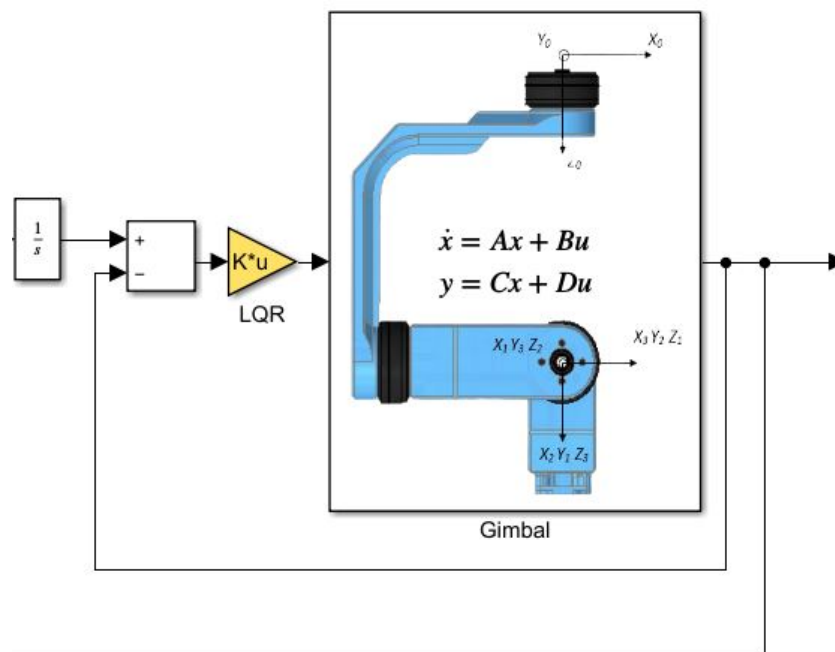


Figura 4.3: Segona realimentació

Tal i com s'observa a la Figura 4.3, els valors de la sortida es realimenten en el loop més petit de manera que a l'entrada de la segona realimentació es comparen els últims valors de sortida amb l'error respecte la posició desitjada dels tres eixos. A la mateixa figura es pot observar un bloc d'integració  $\frac{1}{s}$  que, mitjançant l'agregació d'un pol al sistema, afegeix estabilitat al conjunt. Posteriorment es fa la diferència dels valors descrita anteriorment i es multipliquen per un guany definit pel producte  $K \cdot u$  que ve donat pel càlcul LQR realitzat amb Matlab, on  $K$  és la matriu que conté la informació del model sencer i afecta per separat a les variables de sortida. Finalment, tal i com es veu a la Figura 4.1, hi ha 6 Scopes que permeten veure els valors de les variables de posició i velocitat a mesura que transcorre el temps i es pot saber si el sistema dissenyat funciona correctament. A continuació es mostren les sortides de les tres variables de posició:

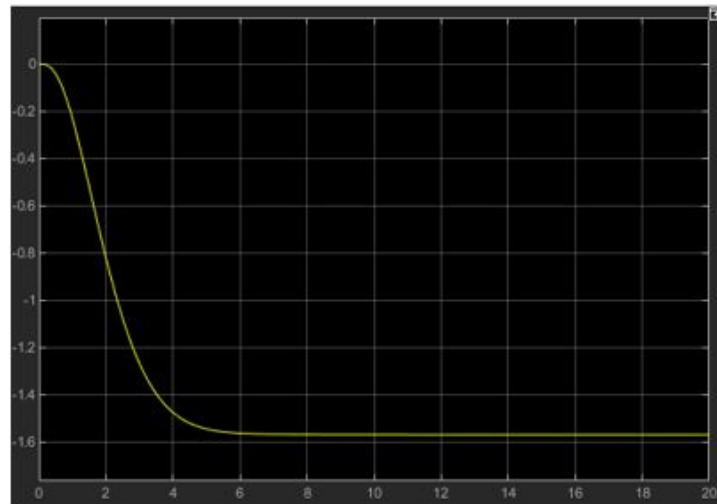


Figura 4.4: Evolució dels valors de posició de YAW apropant-se al valor objectiu

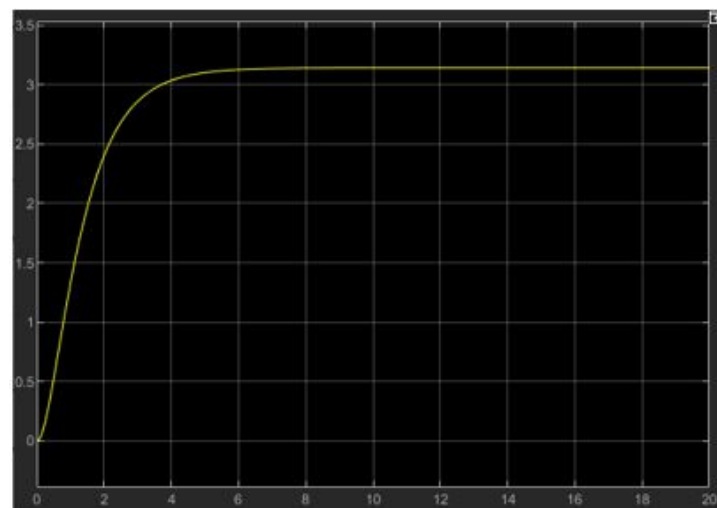


Figura 4.5: Evolució dels valors de posició de PITCH apropant-se al valor objectiu

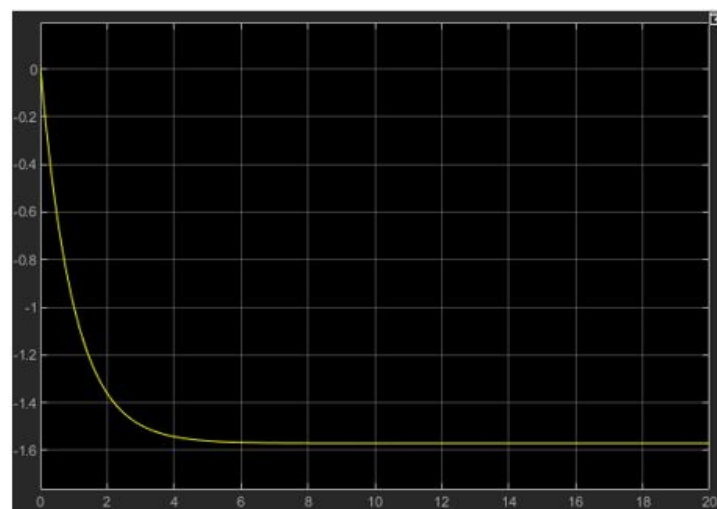


Figura 4.6: Evolució dels valors de posició de ROLL apropant-se al valor objectiu



Com es pot observar, els valors de posició dels tres angles, a mesura que avança el temps, tendeixen a buscar el valor objectiu de cada un. D'aquesta manera es pot assumir que el model dissenyat és bo. Tot i així, cal veure si la reacció és prou ràpida per als requeriments de velocitat del sistema.

### 4.2.2 Model Simscape Multibody

Gràcies a l'eina Multibody, es té una referència més de la controlabilitat del sistema. El multibody fa tota la feina realitzada anteriorment a partir del model CAD importat del PTC Creo agafant totes les propietats del model acoblat, com per exemple, les inèrcies, masses, etc. A més simula totes les articulacions i motors de manera que pot fer tots els càlculs necessaris per formular i resoldre les equacions de moviment.

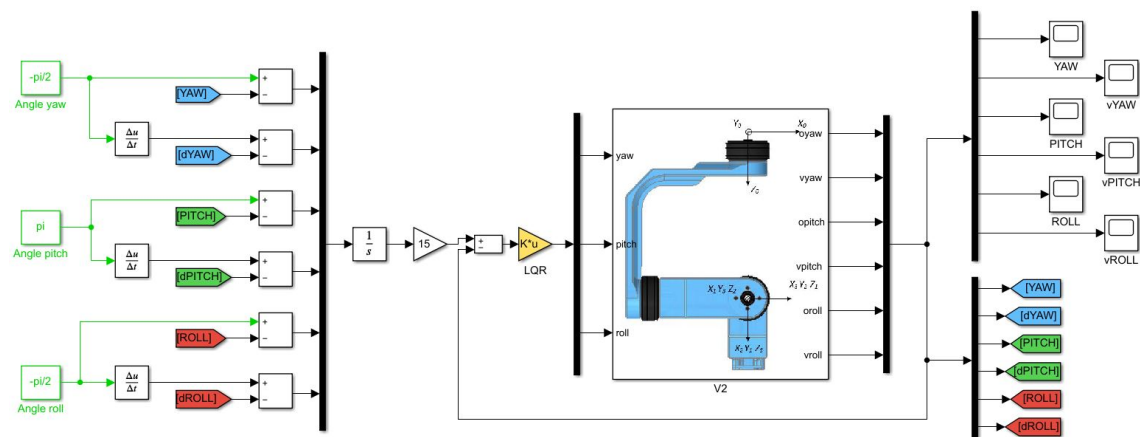


Figura 4.7: Model complet de multibody

El funcionament d'aquest sistema és equivalent al sistema explicat a l'apartat 4.2.1 amb la diferència que es substitueix el bloc de la planta on hi ha les equacions de moviment, pel bloc del sistema multibody on, internament, hi ha els càlculs fets a partir del model CAD. Degut a la identitat dels bucles de realimentació dels dos sistemes, es procedeix a explicar directament el bloc de planta fet amb Simscape Multibody.

#### 4.2.2.1 Bloc realitzat amb Multibody

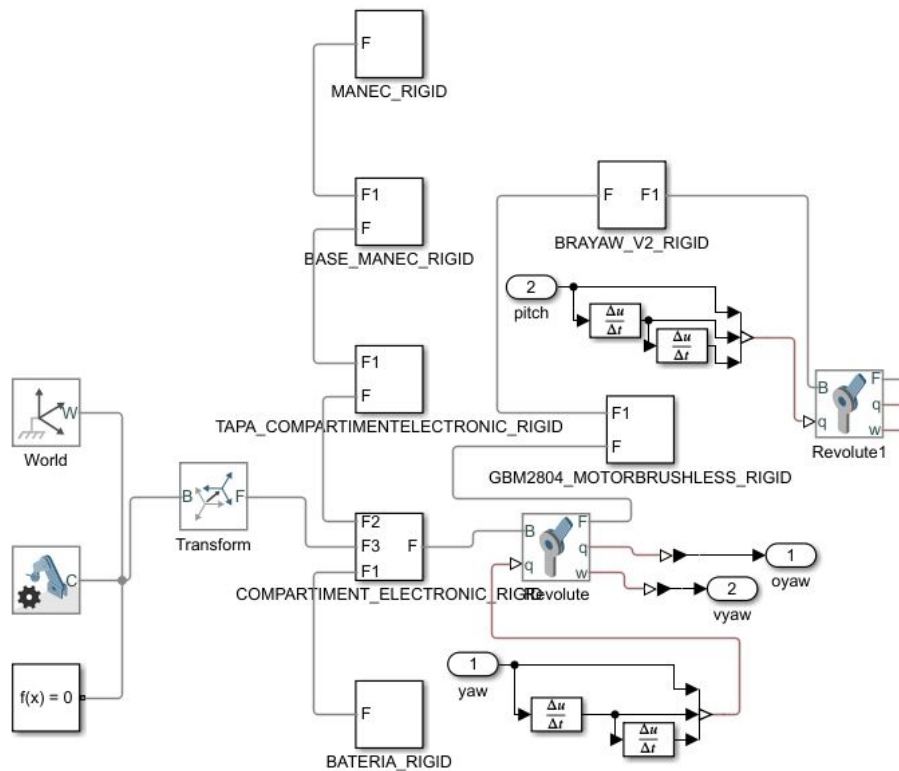


Figura 4.8: Contingut del bloc Multibody

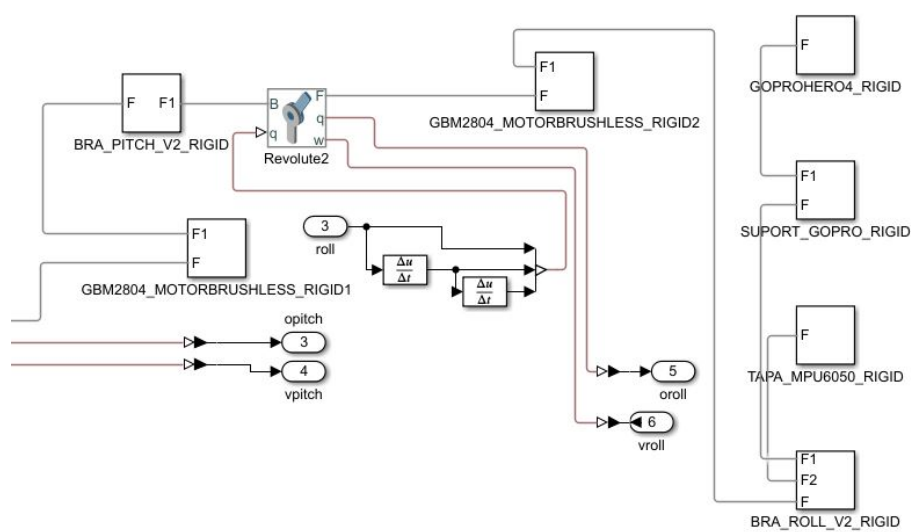


Figura 4.9: Contingut del bloc Multibody

L'esquema de blocs que es veuen a les Figures 4.8 i 4.9 pertanyen al bloc del multibody. La segona imatge és la continuació de la primera on les tres branques que

surten del bloc Revolute1 continuen a les tres branques a la part esquerra de la segona imatge. Aquest esquema representa l'acoblament realitzat amb PTC Creo on s'interpreten tots els cossos que el formen i la relació entre ells incloent els motors. Com es veu a la Figura 4.7, hi ha 3 Inputs al bloc i 6 Outputs. Aquestes entrades i sortides interactuen amb la resta de blocs donant tota la informació necessària per tal de realitzar tots els càlculs i es veuen reflectides dins el bloc amb les etiquetes que van de l'1 al 3 i de l'1 al 6 respectivament:

- Inputs:
  - 1: Posició angular del Yaw.
  - 2: Posició angular del Pitch.
  - 3: Posició angular del Roll.

D'aquests valors de posició s'extreuen els valors de velocitat i acceleració associats mitjançant la primera i segona derivada.

- Outputs:
  - 1: Posició angular de sortida del Yaw.
  - 2: Velocitat de sortida del Yaw.
  - 3: Posició angular de sortida del Pitch.
  - 4: Velocitat de sortida del Pitch.
  - 5: Posició angular de sortida del Roll.
  - 6: Velocitat de sortida del Roll.

#### 4.2.2.2 Resultat de la simulació

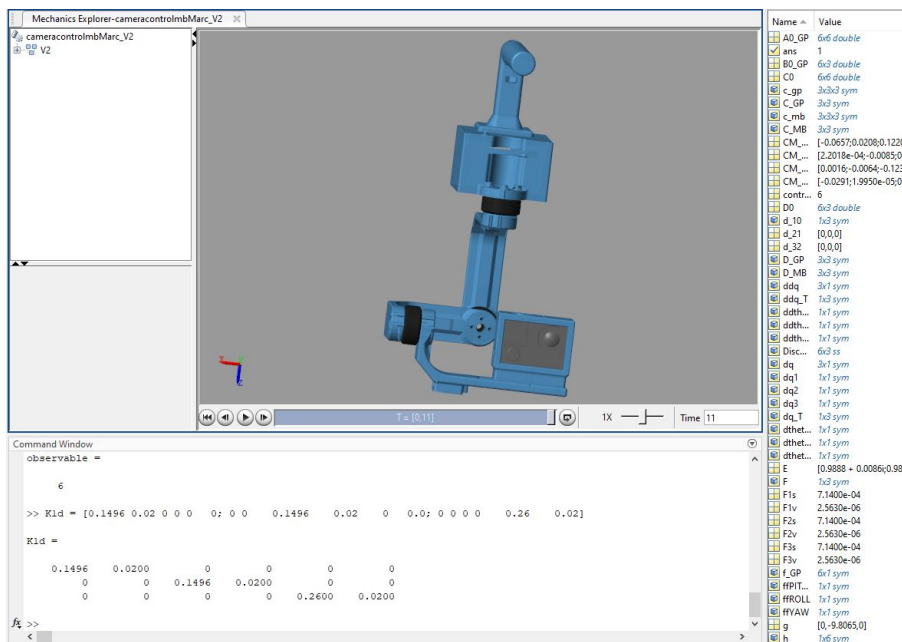


Figura 4.10: Resultats de la simulació amb l'eina Multibody

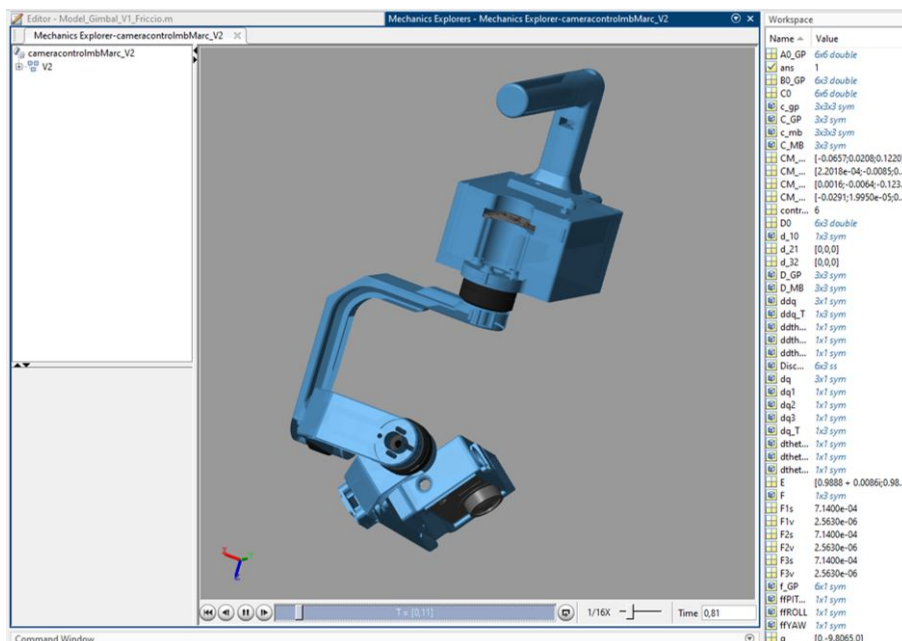


Figura 4.11: Exemple de moviment del model en Multibody

La simulació en aquest cas, dura 11 segons, suficient per veure que el dispositiu es col·loca a la posició d'equilibri. Tal i com s'observa a la figura 4.11, quan han transcorregut 0,81 segons, els braços han començat a dirigir-se a la posició d'equilibri.

Les posicions angulars es poden veure gràcies als Scope dels angles:

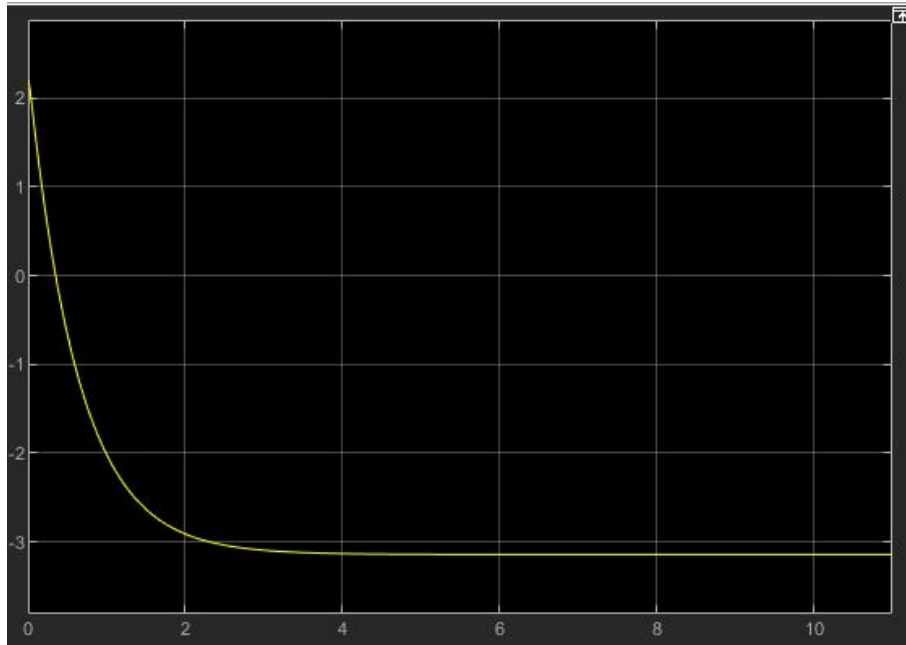


Figura 4.12: Evolució posició de l'angle Yaw

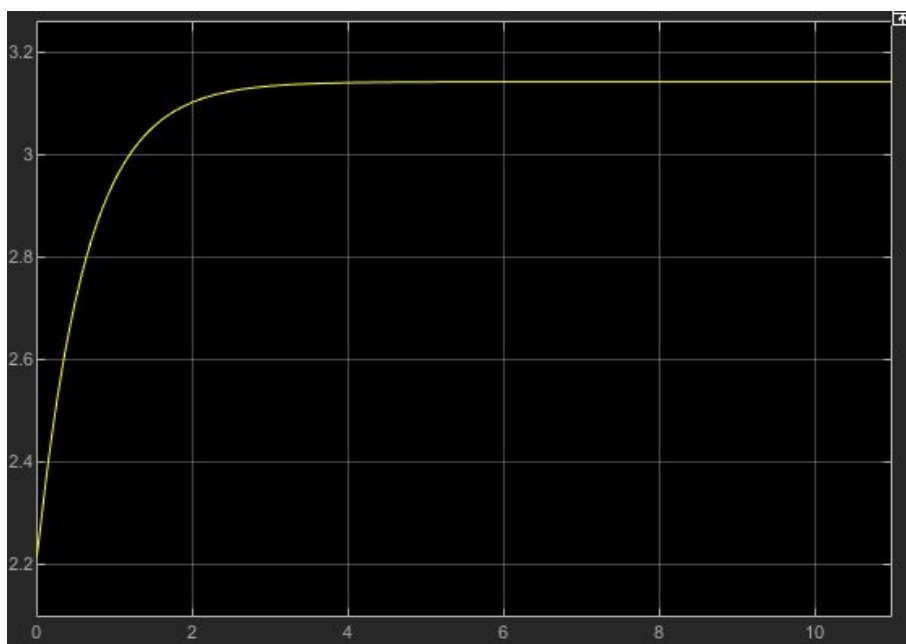


Figura 4.13: Evolució posició de l'angle Pitch

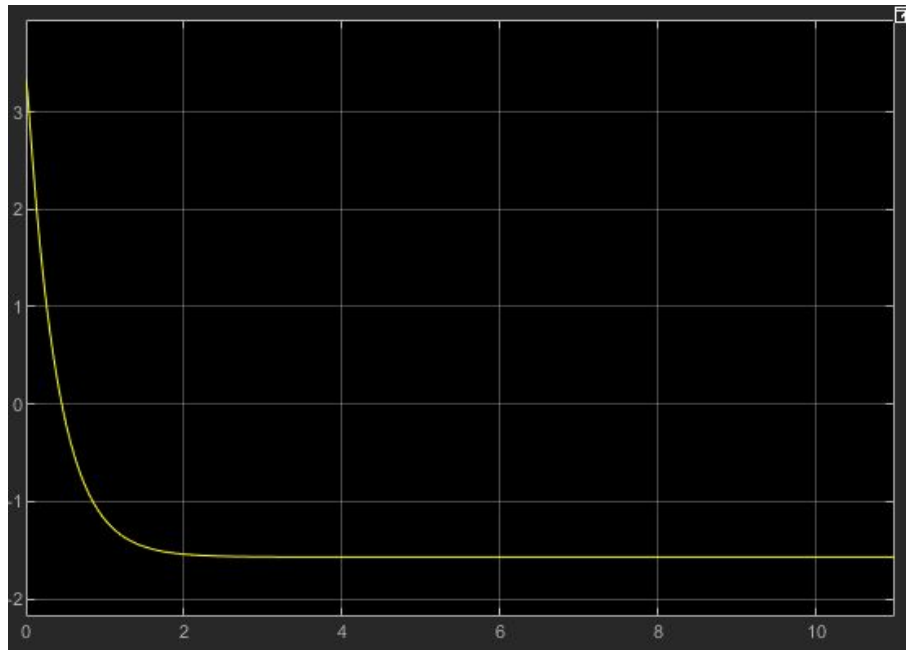


Figura 4.14: Evolució posició de l'angle Roll

Tal com s'observa a les darreres imatges, el sistema tendeix a equilibrar-se i a anar a buscar la posició indicada a les entrades del sistema. Veient que els dos mètodes de simulació funcionen correctament, es considera el model com a apte.

# Capítol 5

## Tests i modificacions

En aquest capítol es mostraran totes les modificacions que s'han fet al prototip final des de l'inici i com s'ha testejat. Per començar, es fa una petita explicació de com s'ha muntat el prototip després de fabricar totes les peces.

### 5.1 Construcció del prototip

La construcció d'aquest dispositiu és senzilla i ràpida, ja que com s'ha vist al capítol 3, el dispositiu disposa de relativament poques peces i són de fàcil acoblament.

#### 5.1.1 Acoblament del sensor

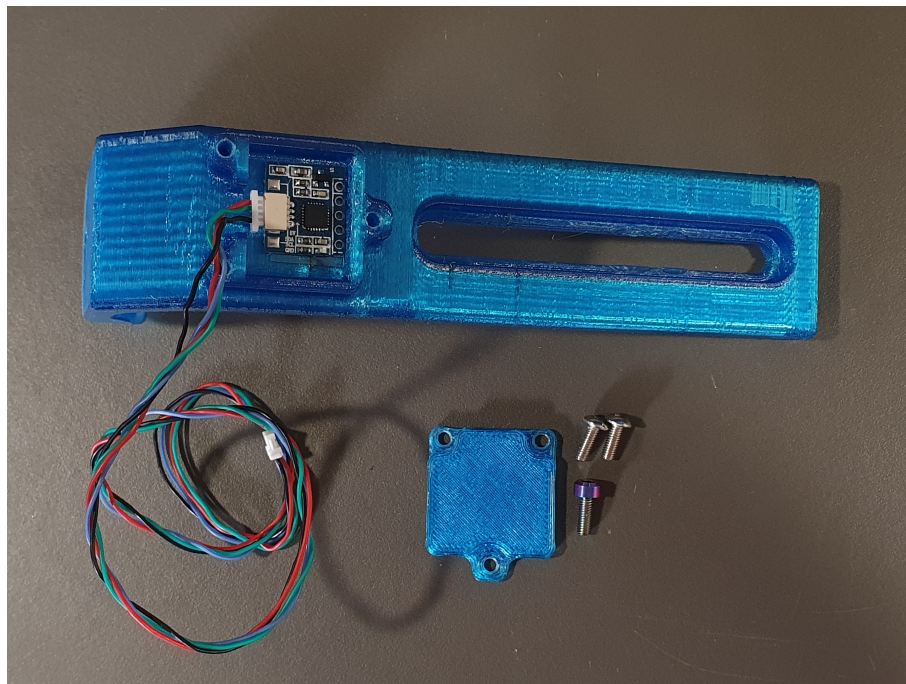


Figura 5.1: Compartiment del sensor i tapa per protegir-lo

Tal i com es veu a la Figura 5.1, el sensor s'enganxa amb cinta adhesiva de doble cara al compartiment i posteriorment es colla la tapa amb tres cargols M3x8.

### 5.1.2 Acoblament dels motors

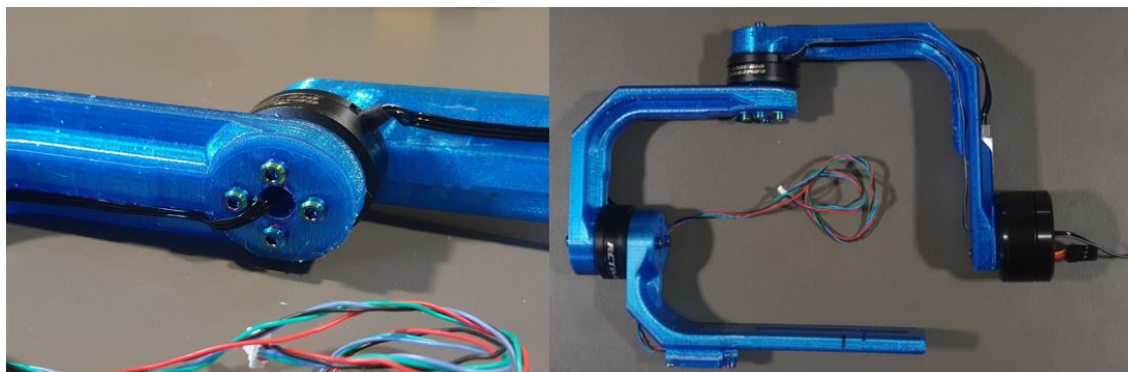


Figura 5.2: Vistes del muntatge dels motors i pas dels cables.

Per acoblar els motors als braços individuals es necessiten quatre cargols M3x15 i quatre més per acoblar aquest conjunt al següent braç. Tal i com es veu a la Figura 5.2, s'aprofita per lligar els cables dels motors als braços i es passen per l'eix buit de cada motor.

### 5.1.3 Acoblament del compartiment electrònic

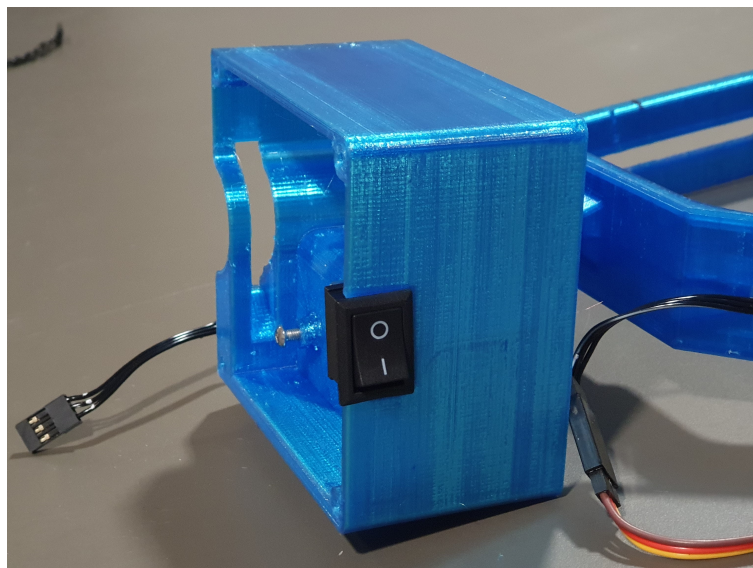


Figura 5.3: Vista de l'interruptor incorporat com a millora.

Una millora que s'ha realitzat a aquesta part és l'orifici generat per l'interruptor que es veu a la Figura 5.3 per facilitar l'entrada i bloqueig de voltatge al dispositiu per parades curtes.



La bateria es col·loca a l'habitacle fet de manera que quedi ben agafada i no pugui moure's en excés i la placa controladora es col·loca amb dos cargols M3x8 als suports fets específicament per a ella de manera que quedi segura i rígida.

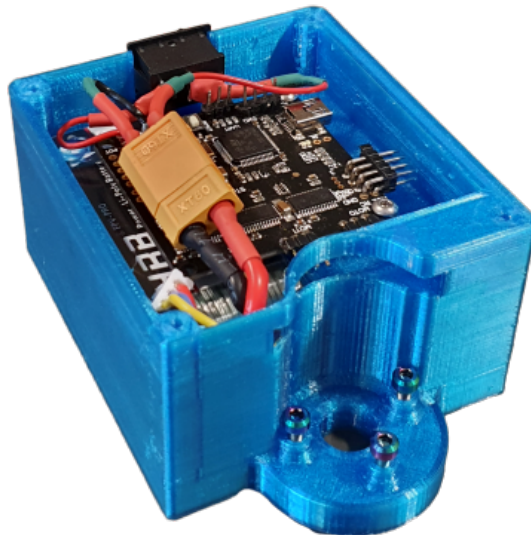


Figura 5.4: Vista de la placa i la bateria muntades al compartiment

#### 5.1.4 Acoblament del mànec



Figura 5.5: Vistes de les parts que formen el mànec i la tapa.

Per acoblar les dos peces del mànec es necessita un cargol M6x25 i una femella M6 i s'acobra de la manera que es veu a la Figura 5.5 i per últim, cal acoblar el conjunt del mànec a la tapa del compartiment electrònic amb 4 cargols M3x12 i 4 femelles situades a la tapa. La tapa es colla al compartiment electrònic mitjançant quatre cargols M3x12.

### 5.1.5 Acoblament dels dispositius

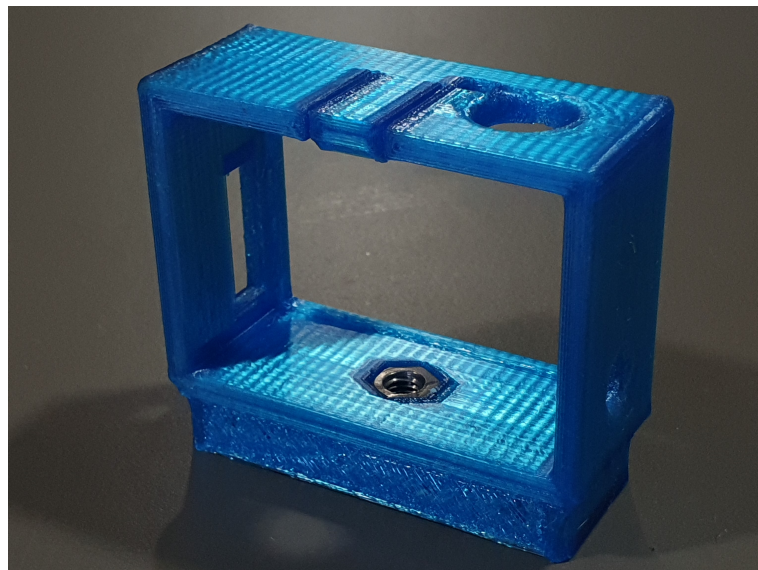


Figura 5.6: Vista de la femella ensotada al suport.

Per collar els dispositius es col·loquen les femelles M6 als suports tal i com es veu a la Figura 5.6 i es collen mitjançant el cargol M6x10.

### 5.1.6 Prototip final

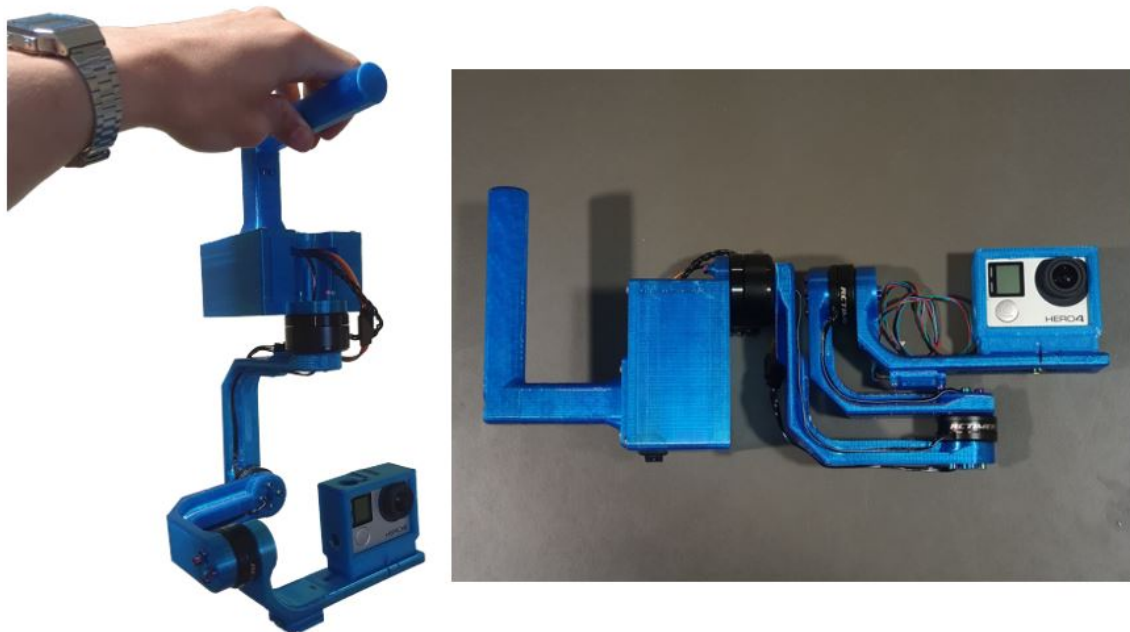


Figura 5.7: Vista del muntatge final del prototip.

# Capítol 6

## Resultats

A aquest capítol es fa una reflexió sobre si s'han assolit o no els objectius principals plantejats a l'inici d'aquest document. Es valoraran també els punts forts i febles del prototip final i els aspectes a millorar.

Seguint la llista dels objectius inicials, s'observa que:

- S'ha vist un enfocament diferent de la part de control a la que es veu a l'assignatura de Control Discret. Això és degut a l'aposta per una metodologia enfocada a les tècniques més modernes que es fonamenten de la teoria vista a l'assignatura. De totes maneres, el concepte general de la teoria de control s'ha vist extensament durant el desenvolupament de la simulació del sistema compensador. Per tant, es considera assolit aquest objectiu, a més, s'han obtingut nous coneixements a banda d'entendre millor els ja adquirits durant el curs.
- El model matemàtic ha servit per descriure i representar de manera aproximada el sistema. L'anàlisi de la cinemàtica i dinàmica han estat importants pel posterior desenvolupament del model Simulink. Així que s'ha assolit amb èxit l'objectiu de realitzar un model matemàtic satisfactòriament.
- Els models Simulink i Simscape han estat una eina vital pel resultat final, ja que han permès veure el comportament del sistema, i més important, han permès veure si el sistema era estable i controlable. Gràcies a aquestes eines i vistos els resultats de les simulacions, s'ha pogut arribar a complir l'objectiu establert a l'inici amb èxit.
- La realització del disseny CAD de tot el model ha estat una de les tasques més entretingudes i fàcils de realitzar, però al mateix temps, una de les més importants per obtenir les propietats que tindrà l'estabilitzador i poder realitzar la simulació correctament.
- El fet de haver fabricat tota l'estructura del dispositiu amb una impressora 3D particular, ha suposat tenir la visió del potencial que tenen aquestes màquines per realitzar prototips, i cal dir que els resultats obtinguts han estat excel·lents.  
Per tant, es consideren assolits els objectius de dissenyar mitjançant un programa CAD i construir el dispositiu amb peces fabricades amb una impressora 3D.

Els aspectes a millorar del prototip que s'han pogut observar son els següents:

- Millora del condicionament i pas a través de les parts de l'estabilitzador dels cables dels motors i el sensor IMU. Tot i que s'han pogut fer passar pels eixos buits dels motors, cosa que ha ajudat molt a treure'ls del camí, caldria dissenyar algun suport addicional o redissenyar els braços de manera que simplement s'hi afegixi un conducte per fer-los passar per l'interior i fer que siguin menys visibles i quedin més ben protegits.
- Possible millora de l'optimització de l'espai al compartiment electrònic per tal d'obtenir un compartiment més compacte i amb lloc per amagar les parts sobrants de cables.
- Optimització de l'algorisme de control, reduint línies de codi fent que sigui més ràpid.
- Millora del disseny del suport per a telèfons mòbils, fent que sigui universal i ajustable per poder subjectar qualsevol model del mercat.

# Capítol 7

## Conclusions

En els últims anys aquests dispositius s'han obert un lloc al mercat. En els seus inicis, només la gent que es dedicava a la fotografia els utilitzava a causa de la complexitat que suposava configurar-los i l'elevat cost que suposava poder tenir un dispositiu d'aquesta mena. Actualment, la tecnologia ha arribat a uns nivells tan elevats que és possible que gairebé tothom pugui accedir a un d'aquests dispositius pels seus telèfons o càmeres de manera que la complexitat d'utilitzar-los no és gens elevada. Les indústries que es dediquen a dissenyar i fabricar aquests dispositius ofereixen un producte final gairebé insuperable. Es necessita un molt bon equip d'enginyers i professionals capaços de coordinar i acoblar totes les parts que involucren un projecte d'aquesta mena per obtenir un producte precís, fiable i atractiu.

Penso que l'estudi d'aquests dispositius m'ha fet veure tot el treball que hi ha darrera d'un producte d'aquesta mena, i tot i així, encara no l'he vist tot. El prototip obtingut és un exemple més simplificat que es podria considerar DIY (Do It Yourself), que la gent podria realitzar per aprendre i veure el funcionament d'aquests dispositius tan peculiars i que són tan espectaculars quan estan en funcionament.

Em sento realitzat després d'haver pogut treballar el projecte de cap a peus, realitzant tots els passos necessaris per aconseguir l'objectiu passant per tots els entrebancs que m'he anat trobant pel camí, però que al final han servit per aprendre un munt de nous conceptes i aprofundir encara més els coneixements de moltes de les assignatures cursades en aquest grau.

Realitzar aquest projecte m'ha donat la visió general de com planificar i organitzar un projecte real i una idea de la complicació que pot arribar a suposar lligar totes les variables que apareixen al llarg del camí. Penso que un projecte Mecatrònic és, dins del camp de l'enginyeria, un dels més complets, ja que no només es tracta de dissenyar la part mecànica del projecte, ni d'escollir quins components electrònics hauria d'utilitzar, sinó que és trobar les dues coses. Per fer-ho, cal saber dissenyar paral·lelament els dos camps i trobar el cercle de realimentació capaç de comunicar tots els camps, perquè el fet de realitzar un canvi en un d'ells, probablement provocarà haver de realitzar un canvi en l'altre. També cal tenir en compte en aquesta realimentació les simulacions, ja que les simulacions es realitzen a partir dels models realitzats. Per exemple, el càlcul LQR de control, depèn de les inèrcies i més propietats mecàniques del dispositiu, per tant, una modificació a una part mecànica pot suposar una desviació d'aquestes propietats entrades al model de simulació.

Aquest projecte ha estat una experiència molt valuosa que ha servit per introduir-me als projectes d'enginyeria més complexes i serà de gran ajuda a l'hora de realitzar projectes futurs. Considero assolits els objectius establerts a l'inici del projecte, així i tot penso extendre'ls per tal de realitzar un estabilitzador més robust, precís i millorat en general. El prototip obtingut és la base de pròximes versions que puguin crear-se d'aquest projecte on s'aplicaran noves estratègies i es mirarà de posar solució als problemes que pugui tenir.

# Bibliografía

- Grabcad: The largest online community of professional designers, engineers, manufacturers, and students. 2020.
- S. Canan. Three axis gimbal design and its application. 08 2018.
- E. Cardoso, A. Prieto, M. Osorio, and P. Guardado. Modelos cinemático y dinámico de un robot de cuatro grados de libertad. *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones RIELAC*, 38:56–75, 09 2017.
- H. Edlund. Model based automatic tuning and control of a three axis camera gimbal, 2015.
- J. Johansson. Modelling and control of an advanced camera gimbal, 2012.
- Katsuhiro Ogata. *Ingeniería de control moderna*. 1 edition, 2010. ISBN 978-8483226605.
- R. R J and P. Kavitha. Camera gimbal stabilization using conventional pid controller and evolutionary algorithms. pages 1–6, 09 2015. doi: 10.1109/IC4.2015.7375580.

# Apèndix A

## Fricció dels motors

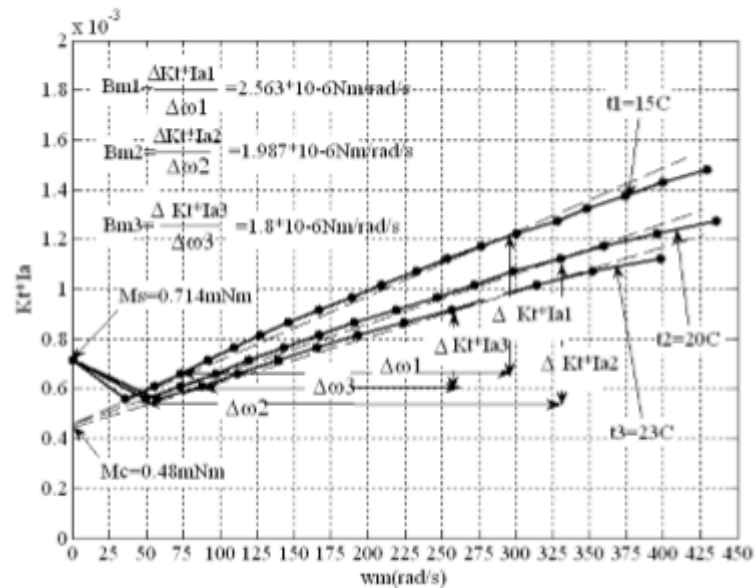


Figura A.1: Taula de determinació de la fricció en motors DC.



# Apèndix B

## Obtenció $C_{ij}$

```
%% Matriu C GoPro
for i=1:3
    for j=1:3
        for k=1:3
            c_gp(i,j,k)=0.5*(diff(D_GP(i,j),q(k))+...
                ...diff(D_GP(i,k),q(j))-diff(D_GP(j,k),q(i)));
        end
    end
end

for i=1:3
    for j=1:3
        C_GP(i,j)=c_gp(i,j,1)*dq(1)+...
            ...c_gp(i,j,2)*dq(2)+c_gp(i,j,3)*dq(3);
    end
end

%% Matriu C Mobil
for i=1:3
    for j=1:3
        for k=1:3
            c_mb(i,j,k)=0.5*(diff(D_MB(i,j),q(k))+...
                ...diff(D_MB(i,k),q(j))-diff(D_MB(j,k),q(i)));
        end
    end
end

for i=1:3
    for j=1:3
        C_MB(i,j)=c_mb(i,j,1)*dq(1)+c_mb(i,j,2)*dq(2)+↔
            c_mb(i,j,3)*dq(3);
    end
end
```

## Apèndix C

# Obtenció dels valors de les forces de fricció dels motors

Fragment de Matlab:

```
%% Friccio
syms T1 T2 T3
F1s = 0.714e-3; % Nm/rad/s
F2s = 0.714e-3; % Nm/rad/s
F3s = 0.714e-3; % Nm/rad/s
F1v = 2.563e-6; % Nm/rad/s
F2v = 2.563e-6; % Nm/rad/s
F3v = 2.563e-6; % Nm/rad/s
ffYAW=F1s*(sign(dthetaYAW))-F1v*thetaYAW;
ffPITCH=F2s*(sign(dthetaPITCH))-F2v*thetaPITCH;
ffROLL=F3s*(sign(dthetaROLL))-F3v*thetaROLL;
F=[ffYAW ffPITCH ffROLL]; %Friccio
```

# Apèndix D

## Obtenció de les matrius del model LQR

Fragment de Matlab:

```
% Equacio de moviment
syms q1 q2 q3 dq1 dq2 dq3
T=[T1 T2 T3].'; %Parells
q = [thetaYAW thetaPITCH thetaROLL].';
dq = [dthetaYAW dthetaPITCH dthetaROLL].';
f_GP = [dq; (inv(D_GP))*(T - C_GP*dq-U_GP.'-F.')]'; %↔
    Sistema no linealitzat per GoPro
f_MB = [dq; inv(D_MB)*(Q - C_MB*q)]; %Sistema no ↔
    linealitzat per Mobil
X = [thetaYAW dthetaYAW thetaPITCH dthetaPITCH thetaROLL ↔
     dthetaROLL]; %variables d'estat
%Q = [T1, T2, T3].';
h = [X(1),X(2),X(3),X(4),X(5),X(6)];
%GoPro:
dq=[dq1 dq2 dq3].';
AO_GP=eval(vpa(subs(jacobian(f_GP,X),[X(1),X(2),X(3),X(4),↔
X(5),X(6),T(1),T(2),T(3)↔
],[0.000001,0.000001,0.000001,0.000001,0.000001,0.000001,0.000001,0.000
,3)) %avaluacio de la funcio en el punt d'equilibri
BO_GP=eval(vpa(subs(jacobian(f_GP,T),[X(1),X(2),X(3),X(4),↔
X(5),X(6),T(1),T(2),T(3)↔
],[0.000001,0.000001,0.000001,0.000001,0.000001,0.000001,0.000001,0.000
,3)) %avaluacio de la funcio en el punt d'equilibri
CO = eval(vpa(subs(jacobian(h,X),[X(1),X(2),X(3),X(4),X(5)↔
,X(6),T(1),T(2),T(3)],[0,0,0,0,0,0,0,0,0]),3))
DO = eval(vpa(subs(jacobian(h,T),[X(1),X(2),X(3),X(4),X(5)↔
,X(6)],[0,0,0,0,0,0]),3))
controlable = rank(ctrb(AO_GP,BO_GP))
observable = rank(obsv(AO_GP,CO))
```